

Capítulo 8

Compactación en suelos del centro y norte de Santa Fe

Compaction in soils of the center and north of Santa Fe

Imhoff, S^{1,2}*

Pilatti, MA¹

Carrizo, ME¹

Masola, MJ¹

Marano, RP¹;

Felli, O¹

* Autor de contacto

ÍNDICE CAPÍTULO

| | |
|---|-----|
| ■ RESUMEN..... | 181 |
| ■ ABSTRACT..... | 182 |
| ■ INTRODUCCIÓN..... | 183 |
| Causas genéticas de la compactación en Santa Fe..... | 184 |
| Causas antrópicas de la compactación en Santa Fe | 189 |
| Evaluación de compactación en sistemas agrícolas | 189 |
| Evaluación de compactación en sistemas ganaderos..... | 199 |
| Estado de compactación general de suelos de la Provincia de Santa Fe..... | 203 |
| ■ REFERENCIAS | 204 |

■ RESUMEN

Los suelos de la provincia de Santa Fe presentan diversos estados de compactación, que varían según el tipo de suelo y el sistema de manejo aplicado. En este capítulo se presentan las causas genéticas y antrópicas de compactación más comunes con ejemplos zonales. Luego se abordan diversos trabajos realizados para recuperar la calidad física de los suelos en sistemas agrícolas y ganaderos. Por último se presentan dos trabajos realizados en los suelos más productivos de toda la provincia de Santa Fe que describen los cambios ocurridos en diversas propiedades físicas a través de indicadores, a saber: porosidad total, macroporosidad, capacidad de aeración, índice de inestabilidad, índice de compresión, presión de preconsolidación, densidad crítica para el crecimiento de las plantas.

Palabras claves

Compactación genética,
compactación antrópica,
propiedades físicas,
productividad de cultivos.

■ ABSTRACT

The soils of the province of Santa Fe have different degree of compaction, which varies according to soil type and applied management system. In this chapter, the most common genetic and anthropic causes of compaction with regional examples are shown. Then, several scientific works that were carried out to recover the physical quality of the soils under agricultural and livestock systems are described. Finally, two scientific works that were carried out in the most productive soils of the province of Santa Fe are described. They describe the changes that have occurred in various soil physical properties through indicators, namely: total porosity, macroporosity, aeration capacity, index of instability, index of compression, pressure of preconsolidation and critical bulk density for plant growth.

Key words | genetic compaction,
anthropic compaction,
physical properties,
crop productivity

■ INTRODUCCIÓN

La compactación de los suelos ha sido reconocida como un problema para la producción agropecuaria en todo el mundo (Soane & Ouwerkerk, 1994). En la actualidad se la considera un problema interdisciplinario, en el cual las interacciones suelo-cultivo-maquinaria-clima cumplen un rol fundamental al determinar la magnitud del problema.

Por un lado, el término compactación es utilizado para definir el proceso de reducción de volumen del suelo en condiciones no saturadas debido a la aplicación de un determinado estrés. Por otro lado se utiliza el término consolidación cuando el proceso ocurre en condiciones de suelo saturado (Gupta & Allmaras, 1987).

Cuando el suelo u horizonte es sometido a un estrés suficiente para cambiar su volumen es posible identificar cuatro factores que pueden causar dicho cambio: 1) compresión de las partículas sólidas, 2) compresión del líquido y aire que se encuentra dentro de los poros, 3) cambio en el contenido del líquido y aire que se encuentra dentro de los poros, 4) reacomodamiento de las partículas sólidas.

Sintéticamente el primer caso ocurre en suelos no saturados. Cuando se aplica un estrés el líquido es desplazado y se aumenta el área de contacto entre las partículas. Como consecuencia el menisco original formado por el líquido asume diferentes formas de acuerdo con la forma de las partículas del suelo, cambiando las fuerzas de tensión superficial del líquido. En general estas fuerzas son reducidas en relación al estrés aplicado. En el segundo caso el cambio de volumen se produce por compresión del aire hasta el momento en que la presión ejercida por el aire causa disrupción de las partículas sólidas que adquieren una nueva forma. Como el agua no se comprime el cambio de volumen del suelo se produce acompañando el cambio en el grado de saturación. Cuando el suelo llega a saturación, cualquier estrés extra que se aplique no causa disminución extra de volumen. En el tercer caso el cambio de volumen del suelo es acompañado de expulsión del agua y/o aire hasta llegar a la situación anterior. En el cuarto caso el cambio de volumen del suelo depende del arreglo estructural de las partículas, de su forma, de las cargas electrostáticas de las partículas y del contenido de agentes de agregación. Aunque el volumen de las partículas sólidas no se altera ocurren cambios en la orientación de las unidades estructurales y en su forma debido a las modificaciones que experimentan los agentes que mantienen unidos los componentes del suelo.

En todos los casos, el cambio de volumen ocasiona cambios en numerosas propiedades del suelo: densidad del suelo, distribución del tamaño de poros, potencial mátrico, conductividad hidráulica saturada y no saturada, tasa de infiltración, permeabilidad al paso del aire, conductividad del sello superficial, resistencia de la costra, resistencia a la penetración de las raíces y capacidad de soporte al tránsito de la maquinaria, entre otras.

El estrés aplicado puede devenir de causas genéticas y/o antrópicas. El tipo de suelo es uno de los factores más importantes que determinan la magnitud de los cambios que resultan del proceso de compactación.

En el centro y norte de Santa Fe predominan los Molisoles y Alfisoles. Dentro de estos órdenes se encuentran Argiudoles, Haplustoles, Natralboles, Natracuoles y Natracualfes. En menor proporción se encuentran Entisoles con arenas de granulometría fina a muy finas. En el noreste santafesino hay Argiudoles acuérticos cuyo horizonte B presenta características vérticas, que en épocas secas presentan

grietas hasta la superficie de 2 a 7 cm. En la región costera adyacente al río Paraná existen zonas de terrazas y bajos tendidos. En las zonas de terrazas predominan los Orthent thapto árgico, familia franco-limosa, sin Na^+ ni sales. En los bajos tendidos el suelo representativo es Natracualf típico que ocupa los planos de interfluvios y redes primarias de avenamiento. La variedad de suelos y de sistemas productivos que se encuentran en la región determinan la existencia de estados de compactación muy variables.

Causas genéticas de la compactación en Santa Fe

El tipo de matriz sólida que constituye cada horizonte edáfico, su posición en el perfil y su dinámica durante el proceso de humedecimiento y desecación ejerce gran influencia. En la región es posible encontrar suelos y/o horizontes cuya matriz puede ser rígida o deformable y presencia de elementos con grados de compactación diversos (e.g. concreciones). Se pueden distinguir los siguientes casos:

- 1) Matriz no rígida, deformable o plástica en mojado.
 - (a) Consistencia del suelo en húmedo friable o menos y en seco ligeramente duro o menos. Cuando la matriz se compacta la dureza aumenta, pasando -en seco- a duro o más. Es el caso de muchos horizontes A y E franco-limosos.
 - (b) Consistencia del suelo firme a más en húmedo y duro a más en seco. La matriz es compacta y presenta naturalmente elevada dureza. Es el caso de horizontes Bt arcillo-limosos a más.
- 2) Matriz rígida:
 - (a) Consistencia del suelo ligeramente plástica a no plástica en mojado. La matriz cambia de friable o menos en húmedo a dura o más en seco. Es el caso de algunos horizontes A o E con poca arcilla presentes en algunos sectores de la costa santafesina del Paraná.
 - (b) Consistencia del suelo no plástica, puede ser suelta en húmedo y no es dura en seco. Es el caso de algunos horizontes A o E con más arena y poca arcilla. Texturas más livianas que las que presentan matriz no rígida, como los arenosos que se encuentran en el albardón costero.
- 3) Concreciones:

En la región es posible encontrar concreciones no continuas de carbonato de calcio (toscas), que se indican con el sufijo "ck" que se agrega al nombre del horizonte en el que se observan. También en algunos Natracualf es posible encontrar concreciones de Fe_2O_3 en horizontes B a más de 50 cm de profundidad en la zona de Esperanza, en áreas de desborde de ríos y arroyos.

Ejemplos zonales

Caso 1, inciso b: horizonte Bt.

En La **Figura 1**  se observa el perfil de un Argiudol típico serie Esperanza, el más representativo del centro de Santa Fe, especialmente de la Pampa Llana Santafesina centro y este. En superficie se observa el horizonte A con color grisáceo oscuro y más abajo la primera parte del B de color rojizo oscuro (Bt), que en algunos sectores se presenta aún más oscuro por la gran cantidad de barnices húmicos (Bht) que tiñen las caras de los prismas. En profundidad se observa el gran espesor de material de origen, C.



Figura 1. Argiudol típico serie Esperanza, excavación de 4 m de profundidad. En la fotografía se observan los primeros 0,40 m (A y BA), luego hasta 1,5 a 2 m los horizontes iluviales (Bt y BC) y el material de origen loésico (C).

Figure 1. Typic Argiudoll, Esperanza series, 4 m deep excavation. In the photograph, the first 0.40 m (A and BA), then up to 1.5 to 2 m the illuvial horizons (Bt and BC) and the material of loess origin (C) are observed.

Las estructuras del horizonte B se aprecian mejor en la **Figura 2** , que muestra un Argiudol ácuico, serie Humboldt, donde es notorio el agrietamiento y la presencia de bloques angulares gruesos y prismas. También se observa, sobre el techo del Bt, un límite abrupto con grietas en dirección horizontal y sobre las grietas sectores más claros indicadores de condiciones de anaerobiosis periódicas y de intensa eluviación. El Argiudol ácuico serie Humboldt comparte muchas unidades cartográficas con el Argiudol típico.



Figura 2. Detalle del límite abrupto con agrietamiento horizontal entre el horizonte superficial y el Bt, con evidencias de alta eluviación sobre el inicio del horizonte argílico.

Figure 2. Detail of the abrupt limit with horizontal cracking between the surface horizon and the Bt, with evidence of high eluviation on the beginning of the argillic horizon.

Para cuantificar y destacar las limitaciones físicas del Bt por compactación natural se lo compara en el **Cuadro 1**  con el horizonte A del mismo suelo (Argiudol).

De los numerosos datos presentados en el **Tabla 1**  se destacan:

La RP máxima del suelo seco cubre una amplia gama de valores desde menos de 40 MPa en el A natural hasta 10 veces o mucho más en horizontes Bt, acompañando principalmente al incremento en la arcilla y secundariamente a la densidad del suelo (Ds). En horizontes Bt2 y en otros B con características vérticas del noreste santafesino ese valor puede sobrepasar los 1000 MPa.

- La RP crítica, es decir el valor a partir del cual las raíces no pueden elongar en el horizonte, excepto por poros grandes o grietas, varía entre 2,3 a 3,5 MPa; limitando antes en el estrato más arcilloso.
- El contenido hídrico al cual se llega a esas resistencias limitantes (θ_{RP}) son mayores que el contenido hídrico al cual el agua deja de estar fácilmente utilizable para el cultivo (θ_{FU}). Esto implica que las raíces, ante la necesidad de explorar el suelo a mayor profundidad por falta de agua fácilmente disponible, no pueden hacerlo por la elevada resistencia mecánica (RP) del suelo. Como consecuencia la planta que comienza a experimentar estrés hídrico, cierra los estomas. Esto ocurre en el Bt, pero no en el A natural. En este las raíces aún pueden hendir y/u horadar porque la RP no limita gravemente.

Tabla 1. Datos de las características físicas de los horizontes naturales A y Bt1 del Argiudol típico serie Esperanza en el centro de la provincia de Santa Fe (Argentina).

Table 1. Data of the physical characteristics of the natural horizons A and Bt1 of the Typical Argiudoll, Esperanza series, in the center of Santa Fe (Argentina).

| Dato analítico | A | B _{t1} |
|--|--------|-----------------|
| Límite inferior o espesor (cm) | 0 a 15 | 40 a 68 |
| Arcilla % | 22 | 49 |
| Arcilla dispersa % | 2 | 15 |
| Arenas % | 8 | 3 |
| Limo 2 a 50 μm % | 67 | 48 |
| Materia Orgánica (%) | 3,5 | 0,7 |
| Densidad suelo g/cm^3 | 1,26 | 1,36 |
| Densidad partícula g/cm^3 | 2,51 | 2,61 |
| θ_s cm^3/cm^3 (humedad a saturación) | 0,503 | 0,486 |
| θ_{10} cm^3/cm^3 (humedad a 10 cm columna de agua) | 0,480 | 0,479 |
| θ_{30} cm^3/cm^3 (humedad a 30 cm columna de agua) | 0,452 | 0,475 |
| θ_{60} cm^3/cm^3 (humedad a 60 cm columna de agua) | 0,353 | 0,466 |
| θ_{100} cm^3/cm^3 (humedad a 100 cm columna de agua) | 0,329 | 0,460 |
| θ_{FU} cm^3/cm^3 (humedad equivalente a agua fácilmente utilizable) | 0,180 | 0,376 |
| θ_a cm^3/cm^3 (humedad equivalente a 10 % de porosidad de aeración) | 0,353 | 0,336 |
| RP crítica (MPa) (resistencia a la penetración crítica) | 3,8 | 2,30 |
| θ_{RP} cm^3/cm^3 (humedad en que RP se torna limitante) | 0,269 | 0,456 |
| θ_{PMP} cm^3/cm^3 (humedad correspondiente al punto de marchitamiento) permanente | 0,090 | 0,240 |
| Poros > 300 μm cm^3/cm^3 | 0,023 | 0,000 |
| Poros 100 a 300 μm cm^3/cm^3 | 0,028 | 0,000 |
| Poros 50 a 100 μm cm^3/cm^3 | 0,099 | 0,009 |
| Poros 30 a 50 μm cm^3/cm^3 | 0,024 | 0,006 |
| Poros < 30 μm cm^3/cm^3 | 0,329 | 0,460 |
| $K_{s\text{cap}}$ (cm/h) | > 4 | 0,12 |
| IHO cm^3/cm^3 | 0,06 | 0,0 |
| COLE % | 0 | 5,9-8,3 |
| Resistencia máxima (MPa) | 38 | 446 |
| "c" parámetro RP | 4,30 | 5,60 |
| α curva retención hídrica | 0,073 | 0,004 |
| β curva retención hídrica | 0,431 | 0,575 |

Fuente: Pilatti, M. datos no publicados.

- La trama porosa grande (> 100 μm de diámetro) que permitiría a la raíces explorar los poros no existe en el Bt, pero sí está presente en el A. La cantidad de macro y meso poros (100 a 30 μm) es casi nula en el Bt, pero es relativamente importante en el A. Esto se ve reflejado en la conductividad hidráulica saturada capilar (en esta no se tiene en cuenta el flujo por los poros no capilares) que es muy baja en el Bt.
- El Bt se presenta expansivo, tal como lo revela el color y las grietas que se ven en la **Figura 2** *. La presencia de numerosas y continuas fisuras permiten a las raíces encontrar sitios de baja resistencia mecánica pudiendo descender en el perfil a través de las grietas y alcanzar los horizontes profundos.

El IHO (intervalo hídrico óptimo dentro del cual las raíces no tienen mayores limitaciones) es nulo en el Bt. Esto indica que a cualquier contenido hídrico las raíces tienen algún impedimento ya sea por falta de aireación, altas resistencias mecánicas y/o agua no fácilmente absorbible. En cambio en el A sí hay un importante intervalo óptimo para la actividad radical.

En resumen los Bt similares al aquí presentado tienen (a) alta resistencia mecánica, (b) escasa aireación, (c) baja conductividad hidráulica saturada, (d) presencia de barnices en todas la caras de prismas y/o bloques, (e) expansión y contracción con posibilidades de ruptura del flujo capilar cuando las grietas son horizontales; la infiltración profunda del agua es lenta, (f) límite abrupto con el horizonte suprayacente. Las raíces siempre tienen alguna limitación, tanto en húmedo como en seco, tal como lo revela un IHO de cero o próximo a él. Sólo exploran por las grietas y tapizan las caras de las estructuras.

Pilatti *et al.* (1988) evaluaron las propiedades edáficas de un Argiudol típico Divisa de Mayo (su- roeste de Santa Fe) en diferentes situaciones de manejos. Este Argiudol tiene un horizonte diagnóstico con menor contenido de arcilla (cerca de 30%) con respecto a los Argiudoles del centro y noreste santa- fesino (cerca de 50%) y el Bt1 se encuentra a partir de los 28 cm. Se verificó que los lotes bajo agricultura con 8 años de cincel hasta el Bt2 con cobertura de rastrojo casi en forma permanente y los lotes bajo 30 años de agricultura continuada con labranza convencional (arado de rejas con vertedera) presentaron mayor densidad de suelo, menos macroporos y menor conductividad saturada (Ks) que la áreas natu- rales. Limitaciones semejantes fueron mencionadas por Piñeiro & Panigatti (1964, 1972); Zafanella & Gemesio de Zafanella (1966), Piñeiro *et al.* (1982), Orellana (1992).

Para eliminar o atenuar dichas limitaciones se han intentado en Santa Fe variadas alternativas de solución **Tabla 2** .

Tabla 2. Alternativas de solución ensayadas en Santa Fe para atenuar el problema de los horizontes Bt.

Table 2. Alternatives of solution applied in Santa Fe for decreasing the problem of the Bt horizon.

| Tratamientos | Variantes | Autores |
|--------------|-------------------------------------|---|
| Mecánicos | Subsolado Mezcla de horizontes | Piñeiro & Panigatti (1964) Pilatti & Antille (1984) Orellana (1988) |
| Biológicos | Fauna edáfica Sistemas radicales | Pilatti <i>et al.</i> (1988) Pilatti <i>et al.</i> (1987) |
| Químicos | Cal, Yeso, Otros | Orellana & Pilatti (1990) |

Piñeiro & Panigatti (1964) realizaron ensayos para comparar la productividad de diversos cultivos al realizar labores profundas: subsolado y mezcla de horizontes en un Argiudol típico serie Rafaela. Los

autores descartaron la conveniencia de mezclar los horizontes debido a la depresión productiva que experimentaban los cultivos en épocas secas.

Pilatti & Antille (1984) durante dos años consecutivos realizaron ensayos en 3 lotes con Argiudol vértico serie Reconquista, al este de Margarita (noreste de Santa Fe), cuyo horizonte BA comenzaba a los 20 cm y el B_{t1} entre los 25 a 35 cm según el lote. Se realizaron tres tratamientos (a) labranza convencional con arado de rejas y vertederas hasta los 14 cm (b) labranza vertical hasta los 40 cm y (c) desfonde con arado con rejas y vertederas mezclando el A con 6 cm del BA. En todos los casos se sembró girasol. El rendimiento del girasol en el tratamiento testigo fue de 1050 kg grano/ha, mientras que en los otros tratamientos el rendimiento del cultivo fue 200 y 300 kg superior, la biomasa aérea aumentó entre 600 y 3300 kg MS/ha, por la mayor disponibilidad de N. Se midieron raíces hasta los 64 cm (inicio de B_{t2}) pero el 85% de la biomasa radical se encontró sobre el Bt (25 a 35 cm). Con la mezcla de horizontes se incrementó en 3 a 5% el contenido de arcilla. Se modificó favorablemente la densidad, macroporosidad y resistencia mecánica en (b) y (c) pero un año después este efecto desapareció.

Orellana (1988) realizó un ensayo con muestras perturbadas del A y Bt1 del Argiudol típico serie Esperanza con 24 y 48% de arcilla respectivamente (menos del 10% de arena). El autor realizó 3 mezclas, además de los horizontes naturales creando una secuencia de 24 – 30 – 36 – 42 y 48% de arcilla para observar cómo evolucionaba la agregación según el tenor de arcilla y durante 20 ciclos de humectación y secado (h/s). El porcentaje de agregados aumentó con el tenor de arcilla y con los ciclos de humedecimiento-secado hasta el décimo ciclo, luego los valores permanecieron estables. Los neoagregados, provenientes de las mezclas, no igualaron la agregación original, indicando la necesidad de que operen otros factores además de los ciclos de humedecimiento-secado. Para lograr una agregación aceptable en el horizonte A el % de arcilla debe ser 30% o algo superior; por encima del 42% se observó tendencia a la desagregación por fisuración.

Pilatti *et al.* (1987) evaluaron sobre un Argiudol típico y un ácuico en Esperanza (centro de Santa Fe; datos del Bt mostrados en la **Tabla 1** *) los cambios que en el BA y B_{t1} produjeron forrajeras semipermanentes (a) con raíces pivotantes (*Medicago sativa*, *Lotus corniculatus*, *Glycine javanica*), (b) fasciculadas (*Falaris*, *Gramma rhodes*, *Bromus auleticus*-cebadilla chaqueña), respecto a (c) un área sin vegetación y (d) con cultivos anuales (labranza convencional). En general las forrajeras con raíces fasciculadas mejoraron en ambos estratos la macroporosidad disminuyendo la D_s, destacándose la Cebadilla chaqueña. Las forrajeras con raíces pivotantes sólo tuvieron efecto positivo en el BA. Ninguna especie modificó la inestabilidad (expansión, contracción) del horizonte.

Pilatti *et al.* (1988) evaluaron la fauna edáfica en 5 lotes con Argiudol típico bajo distintos manejos del suelo, ubicados próximos a Godeken y La Chispa (suroeste de Santa Fe). La fauna edáfica microartrópoda representada por 12 taxones varió entre 216.000 y 35.000 individuos por m² en los primeros 11 cm para el suelo virgen y labranza convencional continua respectivamente; no se observó actividad de la fauna en el Bt lo que pone de manifiesto las condiciones restrictivas de dicho horizonte para la biota (Ing. Osvaldo Felli, comunicación personal, reconocedor de la fauna edáfica).

Orellana & Pilatti (1990) sobre el Argiudol ácuico serie Humboldt después de comparar en laboratorio el efecto de varias enmiendas cálcicas sobre la agregación de muestras perturbadas extraídas del Bt (Orellana & Diez, 1988) escogieron Cl₂Ca y (HO)₂Ca para aplicarlos directamente sobre el techo del Bt, extrayendo los horizontes suprayacentes. Luego de la aplicación se repusieron los horizontes según

la secuencia natural. El ensayo duró 16 meses, pasaron por el Bt 132 mm de agua. Ambas enmiendas redujeron la Ds, pero el efecto del Cl_2Ca disminuyó con el pasaje del agua por el Bt. La macroporosidad aumentó de 4 a 9%. El COLE se redujo a la mitad y a un tercio según la enmienda; la cal produjo resultados estables en el tiempo no así el Cl_2Ca . La RP del suelo con Cl_2Ca se redujo notablemente equiparándose al horizonte A pero su efecto no fue perdurable en el tiempo. La cal redujo la RP en menor proporción que el Cl_2Ca y el efecto se mantuvo en el tiempo.

Sandoval (1981) realizó un ensayo en macetas con *Lolium perenne* para detectar: i) el orden de deficiencia de nutrientes en los principales horizontes del Argiudol típico Esperanza utilizando la “técnica del elemento faltante” o “Chaminade”, ii) para poner de manifiesto la limitación física al desarrollo del cultivo. Se compararon las producciones de los tratamientos “completos” (adición de todos los nutrientes) de cada horizonte y de la mezcla de ellos (horizontes A, BA y Bt). Se comprobó que la mayor producción se produjo con la “mezcla” de horizontes, seguida con 20-25% menos de producción en el A y BA, y casi 50% menos en el horizonte Bt, demostrando las características restrictivas naturales que este horizonte presenta para el desarrollo de los cultivos.

Causas antrópicas de la compactación en Santa Fe

La compactación de los suelos en la provincia de Santa Fe deviene de la elevada susceptibilidad de los suelos a sufrir compactación asociada al hecho de que sustentan diversas actividades productivas desde hace más de 100 años. Los sistemas productivos han cambiado de ganaderos, a ganaderos-agrícolas y, más recientemente, a agrícolas, y quedan pocos sistemas mixtos. Una característica común a todos es la intensificación que ha causado degradación de las propiedades químicas, físicas y físico-químicas. Entre los factores que han acentuado el problema de compactación de los suelos se pueden mencionar:

- a. Pérdida de materia orgánica y de cationes causada por el tipo e intensidad de laboreo y por la extracción de los cultivos.
- b. Pisoteo del ganado en condiciones inadecuadas de humedad.
- c. Laboreo del suelo en condiciones inadecuadas de humedad.
- d. Tránsito de maquinaria cuyo peso excede la capacidad de soporte del suelo.
- e. Adición de elementos dispersantes con aguas bicarbonatadas sódicas y otros líquidos, como efluentes derivados de la producción pecuaria.

Numerosos trabajos se han desarrollado en la región para determinar el grado de deterioro del suelo evaluando diferentes propiedades físicas. También se han realizado trabajos para identificar posibles formas de recuperación. A continuación se presentan algunos resultados.

Evaluación de compactación en sistemas agrícolas

Uno de los efectos de la degradación de los suelos es la formación de costras y sellos. Numerosos casos han sido evaluados: Orellana & Pilatti (1999), Pilatti & Orellana (2000) y Pilatti *et al.* (2003) que fueron resumidos y actualizados en Pilatti & Orellana (2012). En dicho trabajo se estudió el horizonte superficial (0 a 5 cm) de Argiudoles correspondientes a 3 zonas, ubicadas al

Noreste, Centro y Centro-Oeste de Santa Fe: Reconquista (*Rec*), Hipatia (*Hip*) y San Jorge (*SJo*), respectivamente. Todos estos suelos tienen horizontes A franco limosos (18 a 26 % de arcilla, 60 a 70 % de limo, 5 a 12 % de arenas), cuyo estado físico varía de fuertemente estructurado, granular fino a medio (en suelos naturales o muy bien manejados) a masivo o débilmente estructurado en agregados granulares gruesos o bloques subangulares medios a gruesos, en los degradados (Orellana *et al.*, 1997). En cada zona se seleccionaron lotes representativos de cada área productiva y con intensidades de uso contrastantes: (*Nat*) Naturales, no cultivados; (*LConv*) Labranza convencional: más de 20 años de agricultura continua, con arado de rejas y vertedera; (*R*) rotación agricultura / pradera artificial base alfalfa; (*SD*) cultivados en siembra directa. En la evaluación de la infiltración del sello (*Isello*) intervienen dos grupos de mecanismos de ruptura de agregados: por un lado hinchamiento, dilatación diferencial, dispersión y estallido; por el otro, el golpe directo de las gotas. En la **Figura 3** la curva superior refleja la pérdida de infiltración por efecto del estallido y la inferior integra ambas causas de destrucción.

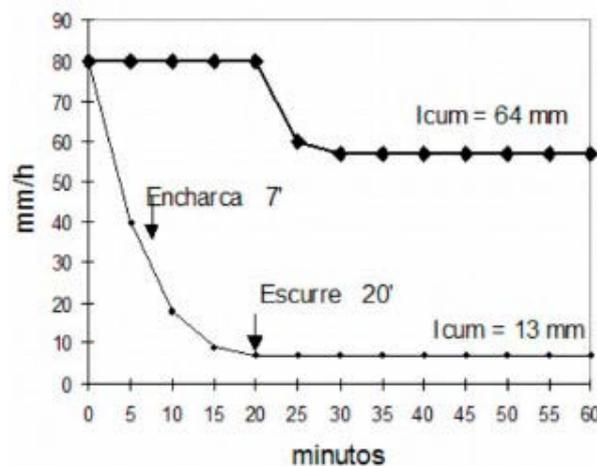


Figura 3. Infiltración a través del sello con protección superficial (trazo superior) y sin ella (trazo inferior); horizonte superficial del Argiudol del noreste de Santa Fe (Reconquista) con labranza convencional (*Icum* = lámina acumulada en 60 minutos).

Figure 3. Infiltration through the seal with superficial protection (upper trace) and without it (lower trace); superficial horizon of an Argiudoll of northeastern Santa Fe (Reconquista) with conventional tillage (*Icum* = accumulated sheet in 60 minutes).

La **Tabla 3** muestra los resultados de las distintas variables evaluadas para las localidades de *Rec*, *Hip* y *SJo*. En todos los suelos se observa un claro deterioro en *LConv* con respecto a la condición natural. La *SD* se comporta mejor que *LConv* ya que el suelo se encharca y escurre más tarde, la infiltración acumulada es mayor, aunque ambos usos de la tierra están muy por debajo del límite crítico.

Se consideró la infiltración acumulada en una hora, de modo que (siendo la precipitación en el ensayo de 8 cm h^{-1}) si infiltra 7,2 cm cuando está protegido, significa que ingresó el 90% del total; luego, por efecto de estallido y otros hubo un deterioro del 10%.

Los *Nat* **Tabla 4** resisten bien ambos mecanismos de destrucción excepto en *Rec* donde el golpeteo hace disminuir la infiltración a la mitad. Con el uso de la tierra la capacidad de resistir los mecanismos de destrucción se reduce, infiltrando menos del 20% de la precipitación. Se destaca *Rec*, donde la lámina infiltrada en 1 hora es de sólo 4,6 cm, poco más de la mitad de lo precipitado (8 cm). Por lo tanto, aún en condiciones naturales, esos suelos son frágiles si quedan sin cubierta vegetal.

Tabla 3. Tiempo para encharcamiento (Ench), para escurrimiento (Esc), infiltración del sello (Isello) e infiltración del sello acumulada (Isello acum) en suelos sin cultivar y con intensidades de uso contrastantes en el centro (Hipatia: *Hip*), centro sur (San Jorge: *SJo*) y noreste (Reconquista: *Rec*) de Santa Fe.

Table 3. Time for ponding (Ench), for runoff (Esc), infiltration of the seal (Isello) and infiltration of the accumulated seal (Isello acum) in uncultivated soils and with contrasting intensities of use in the center (Hypatia: *Hip*), south center (San Jorge: *SJo*) and northeast (Reconquista: *Rec*) of Santa Fe.

| Tiempo | Sitio | Natural | | Convencional | | Siembra Directa | | Límite crítico |
|---|------------|---------|---------|--------------|---------|-----------------|---------|----------------|
| | | Prot | No Prot | Prot | No Prot | Prot | No Prot | |
| Ench (min) | <i>Rec</i> | No | No | No | 10 | No | 15 | >10 |
| | <i>Hip</i> | No | No | No | 11 | No | 22 | |
| | <i>SJo</i> | No | No | No | 7 | No | 6 | |
| Esc (min) | <i>Rec</i> | No | No | No | 37 | No | 47 | >60 |
| | <i>Hip</i> | No | No | No | 24 | No | 38 | |
| | <i>SJo</i> | No | No | No | 20 | No | 35 | |
| Lámina de agua infiltrada | | | | | | | | |
| Isello a los 20 min (cm h ⁻¹) | <i>Rec</i> | 8 | 8 | 5 | 0,8 | 8 | 1,1 | >2 |
| | <i>Hip</i> | 8 | 8 | 5,2 | 0,8 | 7,9 | 2,4 | |
| | <i>SJo</i> | 8 | 8 | 0,8 | 0,7 | 7,2 | 0,6 | |
| Isello acum. en 1h (cm) | <i>Rec</i> | 7,9 | 4,6 | 5,2 | 1,2 | 7,3 | 1,4 | 8 |
| | <i>Hip</i> | 7,9 | 7,6 | 5,2 | 1 | 7,3 | 2,3 | |
| | <i>SJo</i> | 8 | 7,5 | 6,4 | 1,3 | 7,5 | 1,2 | |

Tabla 4. Importancia relativa de los mecanismos de golpeteo y estallido + hinchamiento + dispersión + dilatación diferencial por agua de lluvia en la disminución de la infiltración de cama de agregados en Argiudoles con intensidades de uso contrastantes en el centro (Hipatia: *Hip*), centro sur (San Jorge: *SJo*) y noreste (Reconquista: *Rec*) de Santa Fe.

Table 4. Relative importance of the mechanisms of mechanical effect and slakiny + swelling + dispersion + differential dilatation due to rainwater in the reduction of infiltration of aggregate beds in Argiudolls with contrasting use intensities in the center (Hypatia: *Hip*), south center (San Jorge: *SJo*) and northeast (Reconquista: *Rec*) of Santa Fe.

| Mecanismo destrucción de agregados | | Natural | Labranza convencional | Siembra directa |
|------------------------------------|------------|---------|------------------------|-----------------|
| | | | % pérdida infiltración | |
| Todos | <i>Rec</i> | 43 | 85 | 83 |
| | <i>Hip</i> | 5 | 88 | 71 |
| | <i>SJo</i> | 6 | 84 | 85 |
| Estallido | <i>Rec</i> | 1 | 35 | 9 |
| | <i>Hip</i> | 1 | 35 | 9 |
| | <i>SJo</i> | 0 | 20 | 6 |
| Golpeteo | <i>Rec</i> | 41 | 50 | 74 |
| | <i>Hip</i> | 4 | 53 | 63 |
| | <i>SJo</i> | 6 | 64 | 79 |

Pilatti *et al.* (2004) evaluaron 11 sitios del ámbito santafesino con distintos niveles de sodificación por riego (*R*) y los compararon con áreas en secano (*S*) de cada lote. La sodificación en 5 de los 9 sitios afectó el grado de agregación, disminuyéndolo significativamente. La sodificación redujo entre 45 a 58 % la captación de agua con respecto al secano. Los autores verificaron que, sumando la proporción de suelo no agregado y la proporción de suelo con muy baja cohesión, entre el 49 y 79% del horizonte A careció de agregación. También encontraron una relación positiva y lineal entre la estabilidad de los agregados y

el % de CO, aunque verificaron que la cantidad de CO presente no fue suficiente para atenuar el efecto de estallido, aún en S. Concluyeron que el material edáfico, aún sin efecto del Na, tiene poca agregación.

Otro indicador utilizado para evaluar el estado de compactación en sistemas agrícolas es el intervalo hídrico óptimo (IHO). Los criterios para evaluar la calidad física de un estrato edáfico usando el IHO se presentan en la **Figura 4** (a partir de Pilatti *et al.*, 2008; con modificaciones):

- 1) D_{smin} (densidad mínima) del suelo estudiado: en ella ocurre el máximo valor del IHO o $IHO_{máx}$. En algunos suelos el $IHO_{máx}$ no se obtiene a la mínima D_s sino a una algo mayor.
- 2) D_{sde} (densidad daño estructural): al degradarse la estructura se densifica el suelo reduciéndose los poros de mayor tamaño y se compacta el material sólido. Así, por un lado aumenta RP y por otro, al disminuir la porosidad total, es menor el contenido hídrico en el que se asegura una aeración adecuada (θ_a). Entonces el IHO puede reducirse por dos motivos: (a) aumenta el límite inferior porque se incrementa el contenido hídrico al cual la resistencia mecánica se torna limitante, ($\theta_{RP} > \theta_{FU}$, la resistencia mecánica limita más que el agua fácilmente utilizable); (b) decrece el límite inferior porque es menor el contenido hídrico al cual se asegura una adecuada aeración ($\theta_a < \theta_{cc}$; θ_{cc} : contenido hídrico a capacidad de campo). Por lo tanto $D_{sde} = \min(D_s \theta_a < \theta_{cc}; D_s \theta_{RP} > \theta_{FU})$ está determinada por la menor densidad a la que se evidencie deterioro estructural; ya sea por reducción de la porosidad de aeración o por incremento de la resistencia mecánica: lo que ocurra primero.
- 3) D_{sce} , densidad "crítica estructural" (Imhoff *et al.* 2001). Corresponde a la densidad en el punto llamado "presión de preconsolidación" de la curva de compactación (D_s vs presión aplicada), e indica la máxima densidad que puede alcanzar un suelo sin que la compactación sea irreversible. Por encima de él la degradación estructural es de tal magnitud que el suelo pierde su capacidad de resiliencia: ha sido densificado hasta tal límite que los mecanismos naturales de mullimiento no pueden revertir ese estado.
- 4) $D_{sIHO=0}$: Es la densidad a la cual $IHO=0$ y las raíces siempre tendrán limitaciones, sea cual fuere el contenido hídrico que presente el estrato.

En la abscisa de la **Figura 4** se incrementa la densidad y en la ordenada el contenido hídrico que define los límites del IHO. En la base del triángulo está el mayor IHO posible para ese suelo (la mejor calidad física); en el vértice opuesto, $IHO=0$, representa la peor calidad física.

Figura 4. Esquema para interpretar la calidad física de un estrato edáfico, o su estado de deterioro, a partir de la densidad del suelo y del intervalo hídrico óptimo (IHO). $D_{s_{msn}}$ = mínima densidad observada en el suelo estudiado y que perdura a través del tiempo; D_{sde} = densidad de daño estructural ya sea por disminución de la porosidad total y espacio aéreo o por incremento de la resistencia mecánica; $D_{s_{ce}}$ = densidad crítica estructural en la que el deterioro supera a la capacidad de resiliencia del material edáfico, $D_{s_{IHO=0}}$ es la densidad en que el $IHO = 0$.

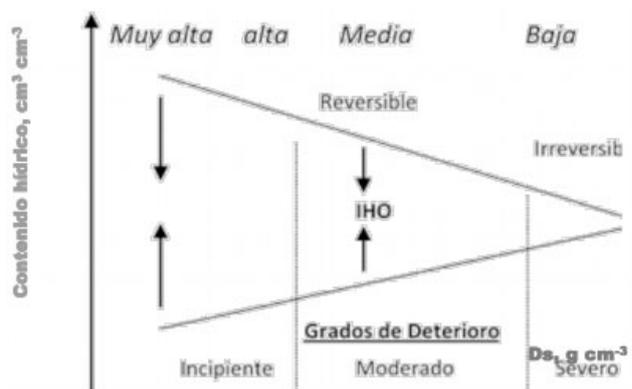


Figure 4. Scheme to interpret the physical quality of an edaphic stratum, or its state of deterioration, from the soil density and the optimal water interval (IHO). $D_{s_{msn}}$ = minimum density observed in the soil studied and that lasts through time; D_{sde} = density of structural damage either by reduction of total porosity and airspace or by increase of mechanical resistance; $D_{s_{ce}}$ = critical structural density in which the deterioration exceeds the resilience capacity of the edaphic material, $D_{s_{IHO=0}}$ is the density in which the $IHO = 0$.

Además, se diferencian dos zonas: una, anterior a Ds_{ce} donde la recuperación física es reversible por mecanismos naturales y/o técnicamente sencillos; hasta aquí el grado de deterioro es, a lo sumo, moderado; y otra, en la cual se ha perdido la resiliencia edáfica, por lo que conseguir disminuir la Ds y mantenerla en valores que aseguren un amplio IHO se torna muy difícil. En esta zona el deterioro físico del suelo puede considerarse severo.

Imhoff *et al.* (2006), Ghiberto *et al.* (2006) e Imhoff *et al.* (2010) utilizaron diversos indicadores para evaluar la calidad física de Argiudoles típicos sometidos a diferentes sistemas de manejo. En la zona de Videla evaluaron: a) SD1: 7 años de siembra directa con rotación de cultivos (maíz-soja-trigo/soja); b) SD2: 7 años de siembra directa con secuencia de cultivos (trigo/soja) y en Gálvez a) LC: 20 años de labranza convencional con secuencia de cultivos (trigo/soja); b) SD: 13 años de siembra directa con rotación de cultivos (maíz-trigo/soja-soja). Parte de los resultados se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Indicadores utilizados para evaluar la calidad física de Argiudoles sometidos a diversos sistemas de manejo en Videla y Gálvez.

Table 5. Indicators used to evaluate the physical quality of Argiudolls subjected to various management systems in Videla and Gálvez.

| Parámetro | Videla | | Gálvez | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| | SD1 | SD2 | LC | SD |
| Densidad de suelo promedio ($g\ cm^{-3}$) | 1,32 | 1,33 | 1,25 | 1,31 |
| IHO ($cm^3\ cm^{-3}$) | 0,12 | 0,11 | 0,15 | 0,08 |
| K_0 ($cm\ h^{-1}$) | 14,7 | 7,0 | 9,2 | 12,0 |
| $K_{0,15}$ ($cm\ h^{-1}$) | 2,5 | 1,8 | 0,8 | 1,4 |
| $K_{0,3}$ ($cm\ h^{-1}$) | 0,9 | 1,0 | 0,4 | 0,6 |
| Macroporosidad (a 0,3 kPa), % | 0,37 | 0,35 | 0,94 | 0,91 |
| Macroporosidad que conduce agua (%) | 0,0144 | 0,0060 | 0,0092 | 0,0119 |
| Número de macroporos efectivos en la conducción de agua (Número m^{-2}) | 183 | 76 | 117 | 152 |

SD1: 7 años de siembra directa con rotación maíz-soja-trigo/soja; SD2: 7 años de siembra directa con secuencia trigo/soja; LC: 20 años de labranza convencional con secuencia trigo/soja; SD: 3 años de siembra directa con rotación maíz-trigo/soja-soja.

La mayor conducción de agua en SD fue asociada a una mayor continuidad de los macroporos con radio de hasta 1000 mm. En ambas localidades el valor de macroporosidad fue semejante entre tratamientos. Sin embargo hubo gran diferencia en la porosidad que efectivamente conduce agua, denotando la mejor condición física del suelo en sistema bajo siembra directa. Los autores corroboraron que la compactación redujo el intervalo hídrico óptimo, la conductividad hidráulica y afectó las características de la porosidad. La inclusión de rotación de cultivos con mayor proporción de gramíneas contribuyó a mejorar las propiedades físicas mencionadas.

Grioni *et al.* (2006) e Imhoff *et al.* (2006) realizaron un ensayo para verificar la influencia de diversos estados de compactación sobre diversas propiedades físicas. El experimento que se realizó en Esperanza (Santa Fe), en un suelo Argiudol ácuico consistió en 5 tratamientos correspondientes a: testigo (T), 4 pasadas de la maquinaria sobre el mismo lugar formando una sola huella simulando tránsito controlado (4P), 4 pasadas cubriendo toda la superficie (4C), 8 pasadas sobre la misma huella simulando tránsito controlado (8P) y 8 pasadas cubriendo toda la superficie (8C). Se midió la densidad del suelo (Ds), la resistencia a la penetración a campo (RP) y compactación relativa (CR). Los resultados se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Valores medios de Densidad del suelo (Ds), Resistencia a la penetración (RP), Densidad relativa (Dsr) y del indicador S cuantificados en el experimento.

Table 6. Mean values of soil density (Ds), penetration resistance (RP), relative density (Dsr) and S indicator quantified in the experiment.

| Parámetros | Tratamientos | | | | |
|---------------------------|--------------|-------|-------|--------|-------|
| | T | 4P | 4C | 8P | 8C |
| Ds (gr cm ⁻³) | 1,30a | 1,40b | 1,42b | 1,44b | 1,50c |
| RP (MPa) | 3,17a | 4,83b | 6,50c | 5,50bc | 6,33c |
| Dsr | 0,85a | 0,91b | 0,93c | 0,94c | 0,97d |
| S | 0,041 | 0,035 | 0,032 | 0,029 | 0,025 |

T: testigo; 4P: 4 pasadas en misma huella; 4C: 4 pasadas cubriendo toda la superficie; 8P: 8 pasadas en misma huella; 8C: 8 pasadas cubriendo toda la superficie. Letras distintas en cada fila representan diferencias estadísticamente significativas a nivel del 95 % según el test LSD (P<0,05).

Ds y RP aumentaron en función de la intensidad de tránsito de la maquinaria respondiendo a una relación logarítmica. A medida que se incrementó Ds, RP aumentó a tasa creciente. No hubo diferencia entre 4C y 8S en el grado de compactación. Esto se atribuyó al efecto de transmisión de la compactación hacia los laterales que lleva a la superposición del estrés aplicado, emulando así el efecto de aplicación de cargas mayores, similares a la aplicada en la huella con 8S. Los valores más elevados de todas las variables se observaron en 8C. Dsr indicó que a partir de 4C la compactación se tornó restrictiva para el desarrollo de los cultivos. Los valores de “S” decrecieron con la intensidad de tránsito de la maquinaria. Según la escala propuesta por Dexter (2004), sólo en T la calidad estructural fue adecuada, en 4S y 4C fue media y el resto “pobre” o totalmente inadecuada. Este indicador resultó muy útil para identificar diversos grados de degradación estructural. Hay que destacar que en 4 P y 8P, entre las sendas de tránsito las condiciones del suelo corresponden a la situación T, lo que demuestra el gran beneficio de realizar la práctica de tránsito controlado. Los resultados generales muestran que la magnitud de la densificación producida dependió de la carga aplicada y de la forma en que se efectuó el tránsito.

Butarelli (2008) e Imvinlkeried *et al.* (2009) en el mismo ensayo evaluaron en años consecutivos los componentes del rendimiento del cultivo de soja. Los autores observaron que el estrés provocado por la compactación afectó diferencialmente los componentes del rendimiento. El número de plantas y el número de granos por unidad de área, el índice de área foliar y la materia seca producida en el estado vegetativo R8 disminuyeron con el aumento de intensidad de tránsito.

Vidal & Aparicio (2008) evaluaron la condición del suelo bajo monte y bajo agricultura continua (Agric) en dos establecimientos ubicados en el domo agrícola del norte santafesino. Se determinó densidad del suelo (Ds), cambio en el diámetro medio ponderado (CMDP) y materia orgánica (MO). Los resultados se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Parámetros evaluados en la situación Monte y Agricultura Continua.

Table 7. Parameters evaluated in Forest and Agriculture Continuous situation.

| Parámetro | Monte | Agricultura continua |
|---|-------|----------------------|
| Densidad de suelo de 3-8 cm (g cm ⁻³) | 0,92 | 1,43 |
| Densidad de suelo de 13-18 cm (g cm ⁻³) | 1,52 | 1,52 |
| Diámetro medio ponderado (mm) | 1,62 | 2,76 |
| Materia orgánica (%) | 2,9 | 1,38 |

Los indicadores variaron entre manejos. El manejo agrícola utilizado produjo severa compactación del suelo.

Pilatti *et al.* (2009) evaluaron indicadores de calidad física para detectar el grado de deterioro y/o recuperación del suelo inducido por la implementación de diferentes sistemas productivos en tres sistemas agrícolas bajo siembra directa (SD) con diferentes cultivos y dosis de fertilizantes (T: 8 años SD sin fertilizante, Fx: 8 años SD con fertilizante, S20: 20 años SD con fertilizante) y el suelo en su condición natural (N). El IHO mostró que las propiedades físicas del horizonte A en N y SD20 contrastaron notablemente con respecto a las de T y Fx; estos tratamientos exhibieron un similar y gran deterioro físico del suelo. En el horizonte BA el IHO fue elevado y similar al del horizonte A sólo en N, en los otros tratamientos disminuyó marcadamente. S20 y N presentaron valores similares de K a las tensiones de 0 y -3 hPa, siendo diferentes ($P < 0,05$) de Fx. Los resultados indicaron que 20 años de SD con rotación de gramíneas y leguminosas y fertilización permitieron revertir el deterioro edáfico del horizonte A, mientras que 8 años con ese sistema no serían suficientes.

Imhoff *et al.* (2009) en un área con variabilidad de rendimientos evaluaron indicadores de calidad física para verificar su capacidad para detectar la variabilidad espacial existente en un lote y, así, poder determinar ambientes homogéneos de manejo. Mediante la observación de mapas de rendimiento del lote se delimitaron 2 áreas de las que se extrajeron muestras no perturbadas para determinar la densidad de suelo (Ds) y el intervalo hídrico óptimo (IHO). Ambos indicadores permitieron corroborar que esas dos áreas diferían en las condiciones físicas y, por lo tanto, que se debería aplicar un manejo diferencial. En la zona a) del lote se obtuvo un Ds crítica de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ **Figura 5a** mientras que en la b) la Ds crítica fue $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ **Figura 5b**. En la zona b) el cultivo en toda la gama de densidades medidas sufrirá condiciones de estrés por RP cuando el contenido hídrico sea inferior a $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y a partir de la $Ds=1,38 \text{ g cm}^{-3}$ el crecimiento será afectado por todas las propiedades físicas. En a) el mayor IHO mejores condiciones físicas para el desarrollo de los cultivos.

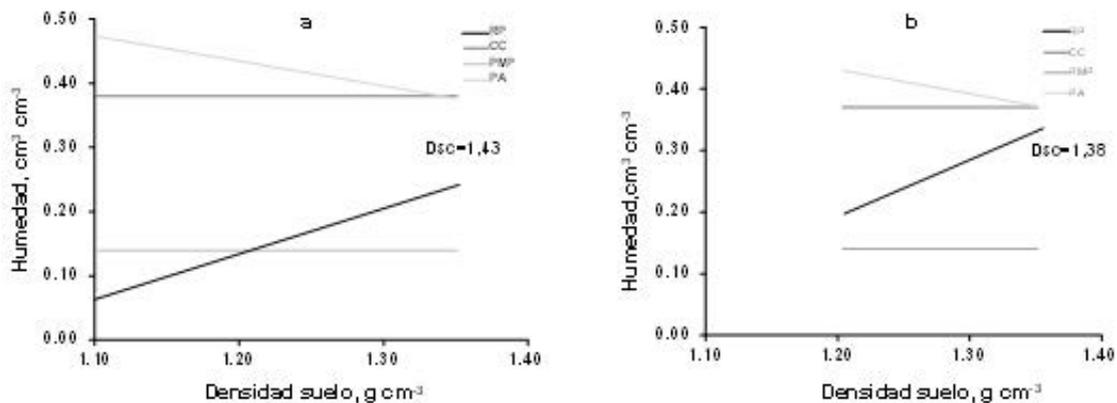


Figura 5. Intervalo hídrico óptimo en las áreas a) y b) en la profundidad de 0-15 cm. Dsc: densidad de suelo crítica (g cm^{-3}); CC: humedad correspondiente a capacidad de campo; PA: humedad correspondiente a 10% de porosidad de aeración; PMP: humedad correspondiente a puntos de marchitamiento permanente; RP: humedad en que la resistencia a la penetración es 2 MPa.

Figure 5. Optimum water interval in areas a) and b) in the depth of 0-15 cm. Dsc: critical soil density (g cm^{-3}); CC: humidity corresponding to field capacity; PA: humidity corresponding to 10% aeration porosity; PMP: humidity corresponding to the point of permanent wilting; RP: humidity in which the resistance to penetration is 2 MPa.

Imhoff *et al.* (2009) aplicaron el método de Calificación Visual a Campo de la estructura (Cvc) para evaluar la calidad estructural de un Argiudol en lotes que se encontraban con agricultura continua (trigo/

soja) en siembra directa y con rotación ganadera-agrícola (alfalfa/avena/maíz) en labranza tradicional. Al momento del muestreo los lotes estaban con trigo y alfalfa. En cada lote se determinó el indicador Cvc promedio para cada sistema. Simultáneamente, se efectuaron a campo medidas de resistencia a la penetración (RP) y de humedad volumétrica del suelo (θ). En SD el valor promedio de Cvc=3; identificándose tres capas: una de reducido espesor (5 cm) con agregados pequeños, redondeados y elevada friabilidad, abundante presencia de raíces que los rodeaban y atravesaban; la segunda capa (15 cm) presentó agregados de mayor tamaño, más angulares, menos friables y marcada disminución de la cantidad de raíces; la tercera capa (8 cm) mostró agregados grandes (6-8 cm), poco friables y muy pocas raíces. En LT el valor promedio de Cvc=2 y se observaron sólo dos capas. La primera (12 cm) presentó agregados pequeños, redondeados, muy friables y elevada cantidad de raíces. En la segunda capa (13 cm) se observaron agregados de tamaño un poco mayor, muy friables y abundante presencia de raíces. La mejor condición estructural en LT, indicada por el menor Cvc, fue corroborada por los valores de RP, que fueron 0,66 MPa y 3,37 MPa en LT y SD, respectivamente. Por lo tanto, la metodología Cvc permitió identificar que en SD existía una capa delgada libre de compactación y otras dos más densificadas, mientras que en LC había dos capas pero ninguna presentaba un estado de compactación elevado. El suelo bajo el sistema LT a pesar de ser considerado menos conservacionista presentó mejor condición estructural lo que se atribuye a la mejor rotación empleada.

Esta misma metodología se aplicó en lotes con manchones con menor crecimiento del cultivo localizados en la zona noroeste de Santa Fe (al oeste de Villa Trinidad) donde pudo verificarse que en los manchones el valor promedio de Cvs fue mayor a 3 **Figura 6** , indicando que esos sectores se encontraban más densificados (Pilatti *et al.*, 2014 datos no publicados).



Figura 6. Fotos correspondientes al área normal y al área denominada manchón (menor crecimiento del cultivo).

Figure 6. Photographs corresponding to the normal area and the area called patch (lower growth of the crop).

Dopazo & Marano (2013) realizaron un ensayo en invernadero para evaluar el impacto de diferentes niveles de compactación de suelo en relación con el crecimiento de raíces y biomasa foliar del cultivo de arroz. El tratamiento compactado (C) tuvo $D_s=1,60 \text{ g cm}^{-3}$ y el no compactado (NC) una $D_s=1,15 \text{ g cm}^{-3}$. El cultivar utilizado fue Puitá INTA (Clearfield). El experimento culminó previo al momento de inundación. Los resultados se presentan en la **Tabla 8** . Los resultados indicaron que hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre ambas condiciones de compactación en todas las variables analizadas, excepto BT+V. La capacidad de exploración de las raíces fue claramente afectada por la compactación, con una diferencia de casi 6 veces en DL. La masa de las raíces (DM) en NC fue el doble respecto a C.

El mayor desarrollo de raíces en NC repercutió en un incremento del 77% en el valor medio de BH, lo que permitió un mejor desarrollo posterior de la planta.

Tabla 8. Valores medios de índice de Área Foliar (IAF), biomasa de tallo + vaina (BT+V), biomasa de hoja (BH), densidad de longitud de raíces (DL), densidad de raíces (DM), y longitud específica (L/M) para los tratamientos compactado (C) y no compactado (NC).

Table 8. Mean values of Foliar Area Index (IAF), stem + pod biomass (BT + V), leaf biomass (BH), root length density (DL), root density (DM), and length specific (L / M) for the compacted (C) and non-compacted (NC) treatments.

| Tratamientos | IAF | BT+V (g) | BH(g) | DL (cm/cm ³) | DM g/m ³ | L/M (m/g) |
|--------------|--------|----------|--------|--------------------------|---------------------|-----------|
| C | 0,28 a | 0,09 a | 0,09 a | 0,1 a | 0,02 a | 58,5 a |
| NC | 0,46 b | 0,12 a | 0,16 b | 0,59 b | 0,04 b | 159,9 b |

Medias con la misma letra en cada columna no tuvieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según test LSD (Fisher)

Marano & Damiano (2014) estudiaron en San Javier dos agroecosistemas que se utilizan para cultivo de arroz: Terraza (Tz) y Bajo Tendido (BT). El suelo característico de TZ es Orthent thapto árgico (OTA), familia franca-limosa, sin Na⁺ ni sales. Presenta buen drenaje, pendiente plana. BT ocupa una superficie aproximada de 120.000 ha extendidas de este a oeste con relieve muy plano y el suelo representativo es Natracualf típico (NAT). En ambos sistemas se evaluó la densidad de suelo (Ds), antes y después del inicio de la inundación en las campañas 2011-12 y 2012-13. Estos valores fueron comparados con la densidad estimada a partir del triángulo textural y densidad de empaquetamiento (De). El horizonte superficial del suelo NAT en el momento previo al riego presentó un valor promedio de Ds muy elevado, igual a 1,63 g cm⁻³, lo que indica una fuerte compactación. Esto se atribuye a efectos combinados de textura, presencia de Na⁺, manejo del agua y del suelo. Finalizado el período de riego se observó una fuerte expansión del horizonte superficial, aún con porcentajes de arcilla menores a 35 %, proceso que redujo Ds a 1,31 g cm⁻³. Los autores concluyeron que estos suelos pueden ser fuertemente compactados por la acción antrópica. Por otro lado los valores de Ds en el suelo OTA no tuvieron cambios antes y después del riego (1,4 y 1,65 g cm⁻³ para el horizonte superficial y subsuperficial). Estos valores elevados se atribuyeron a la condición textural (menos arena), pérdida de materia orgánica y compactación causada manejo del agua y del suelo.

Mieres & Lorenzini (2014) realizaron un ensayo de larga duración en la EEA INTA Reconquista en un suelo Argiudol Acuértico. Los tratamientos considerados fueron: Siembra Directa (SD) y Labranza Convencional (LC) ambas de 8 años de duración, rotación Girasol-Maíz de Segunda/Soja/Trigo-Soja. Se determinó la estabilidad estructural (EE), diámetro medio ponderado (DMP), carbono orgánico total (COT), carbono orgánico particulado (COP), nitrógeno total (NT) y las relaciones carbono orgánico particulado/carbono orgánico total (CP/CT) y carbono nitrógeno (C/N). Los resultados se presentan en la **Tabla 9** . En SD hubo mayor contenido de COP y mayor relación CP/CT, también mayor DMP.

Ds= densidad de suelo; A+L=arcilla+limo; COT= carbono orgánico total; COP= carbono orgánico particulado; CP/CT= carbono orgánico total/carbono orgánico particulado; NT= nitrógeno total; C/N= relación carbono:nitrógeno; DMP= diámetro medio ponderado. Letras distintas indican diferencias significativas para cada profundidad. LSD ($\alpha = 0,05$).

Mieres (2016), en ese mismo ensayo, evaluó la trama porosa del suelo **Tabla 10**  y la producción de los cultivos.

Tabla 9. Valores medios de variables de suelo evaluadas en tratamientos (Trat) en siembra directa (SD) y siembra con labranza convencional (LC) en dos profundidades (Prof) de un suelo franco limoso del norte de Santa Fe.

Table 9. Mean values of soil variables evaluated in treatments (Trat) in direct sowing (SD) and sowing with conventional tillage (LC) in two depths (Prof) of a silty loam soil in the north of Santa Fe.

| Trat | Prof cm | Ds gr cm ⁻³ | A+L % | COT gr kg ⁻¹ | COP gr kg ⁻¹ | CP/CT % | NT gr kg ⁻¹ | C/N | DMP mm | pH 1:2,5 |
|------|---------|------------------------|--------|-------------------------|-------------------------|---------|------------------------|--------|--------|----------|
| SD | 0-10 | 1,38 a | 77,7 a | 10,9 a | 4,35 a | 39,9 a | 1,03 a | 10,6 a | 1,56 a | 5,8 a |
| LC | | 1,36 a | 77,0 a | 10,4 a | 3,57 b | 34,3 b | 1,00 a | 10,3 a | 1,11 b | 5,9 a |
| SD | 10-20 | 1,51 a | 76,6 a | 8,8 a | 2,11 a | 24,3 a | 0,79 a | 11,1 a | 0,89 a | 5,9 a |
| LC | | 1,48 a | 75,3 a | 8,6 a | 1,75 a | 20,1 a | 0,76 a | 11,3 a | 0,81 a | 5,9 a |

Tabla 10. Valores medios de densidad de suelo (Ds), la porosidad total (PT), macroporos (MaP), mesoporos (MeP) y microporos (MiP) en los tratamientos con siembra directa (SD) y siembra con labranza convencional (LC) en dos profundidades (Prof) de un suelo franco limoso del norte de Santa Fe.

Table 10. Average values of soil density (Ds), total porosity (PT), macropores (MaP), mesopores (MeP) and micropores (MiP) in the treatments with direct seeding (SD) and conventional tillage (LC) in two depths (Prof) of a silty loamy soil in the north of Santa Fe.

| Trat | Prof cm | Ds gr cm ⁻³ | PT % | MaP % | MeP % | MiP % |
|------|---------|------------------------|--------|-------|-------|--------|
| SD | 0-10 | 1,38 a | 45,7 a | 5,6 a | 2,9 a | 32,7 b |
| LC | | 1,36 a | 41,5 a | 5,9 a | 5,9 b | 29,6 a |
| SD | 10-20 | 1,51 a | 39,4 a | 6,8 a | 7,3 a | 29,1 a |
| LC | | 1,53 a | 39,8 a | 5,9 a | 8,6 a | 28,0 a |

El autor encontró que la productividad fue mayor en SD que en LC, siendo avorecidos los cultivos segunda como maíz y soja de segunda. Sin embargo, la productividad alcanzada en LC también fue aceptable en el contexto regional. Tampoco varió la porosidad total del suelo aunque hubo mayor volumen de mesoporos en LC y de microporos en SD, denotando mayor compactación. A 7 años de su implementación los cambios determinados en el suelo por SD se limitaron a la capa superficial.

Imvinkelried *et al.* (2014) realizaron un ensayo para evaluar el efecto residual de la descompactación del suelo y la fertilización con P y N en la secuencia soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo (S-T/S-T/S-T) sobre la productividad del agua y la radiación. El experimento se realizó en las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11 en Esperanza (Santa Fe). Los cuatro tratamientos fueron: (i) sin descompactar con alta fertilización (Asd), (ii) sin descompactar con baja fertilización (Bsd), (iii) descompactado con alta fertilización (Ad) y (iv) descompactado con baja fertilización (Bd). Los resultados se presentan en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Cambios en la productividad y eficiencia de uso del agua y radiación en grano y biomasa para los tratamientos con fertilización y descompactación.

Table 11. Changes in productivity and efficiency of water use and radiation in grain and biomass for treatments with fertilization and loosening.

| Parámetro | Fertilización | Descompactación |
|---|---------------|-----------------|
| Aumento en la productividad del agua para grano (%) | 9,26 | 7,41 |
| Aumento en la productividad del agua para biomasa (%) | 7,14 | 10,9 |
| Aumento en la eficiencia en el uso del agua en grano (%) | 6,85 | 5,41 |
| Aumento en la eficiencia en el uso del agua en biomasa (%) | 4,37 | 8,0 |
| Aumento en la productividad de la radiación para grano (%) | 13,3 | 4,1 |
| Aumento en la productividad de la radiación para biomasa (%) | 8,3 | 11,2 |
| Aumento en eficiencia de uso de la radiación para biomasa (%) | 5,2 | 7,5 |

La atenuación de la limitante compactación al inicio de la secuencia y la mayor fertilización del suelo a lo largo de 3 años mejoró la productividad y eficiencia del uso del agua y radiación para la producción de grano y biomasa.

Alesso *et al.* (2017) realizaron un ensayo de tránsito controlado para verificar si la magnitud y distribución espacial de la compactación del suelo, estimada por la resistencia mecánica a la penetración (RP), en torno a las sendas de tránsito podría explicar la respuesta de los cultivos en las hileras próximas a las sendas. Se trató de modelar la distribución espacial de la RP en el plano vertical en torno a las sendas en un Argiudol Típico serie Rafaela de la localidad de Aurelia, Santa Fe (Argentina). Se simularon cuatro intensidades de tránsito (0, 6, 12 y 18 pasadas de un tractor Pauny 230C) en parcelas de 6 m x 30 m, siguiendo un diseño en bloques completos al azar con tres réplicas. Previo a la siembra de soja y trigo, en cada parcela se registró la RP de los primeros 30 cm del suelo cada 2 cm de profundidad (dirección vertical) con un penetrómetro digital de punta cónica cada 5,5 cm en transectas de 110 y 187 cm perpendiculares a las sendas (dirección horizontal), estando el suelo con humedad próxima a capacidad de campo. La distribución espacial de los datos en la grilla vertical XZ de 5,5 cm x 2 cm se modeló mediante técnicas geoestadísticas y se obtuvieron superficies interpoladas por kriging universal. Se estimó la proporción de área con valores de RP > 2 MPa (límite para el crecimiento radical) en las sendas y entre las sendas de circulación. En todos los casos, los valores de RP mostraron tendencia en el plano XZ en ambas direcciones la cual explicó 50-84% de la variación total. La variación residual mostró una estructura espacial esférica con alcances de 15 a 36 cm. Previo a la siembra de la soja no se detectaron diferencias significativas en la proporción de área compactada. En cambio, previo a la siembra del trigo se detectaron diferencias significativas entre las intensidades y entre zonas. La proporción de área compactada siguió una tendencia cuadrática en función del número de pasadas ($Y = 0.25 + 0.035X - 0.00176X^2$). El 45% del área de las sendas tuvo RP > 2 MPa mientras que sólo el 22% mostró compactación fuera de la senda.

Evaluación de compactación en sistemas ganaderos

En los planteos ganaderos más intensivos de la región centro-norte de Santa Fe el recurso forrajero predominante es la alfalfa (*Medicago sativa*) debido a su elevado potencial productivo y calidad. Sin embargo, tal potencial no se logra en algunos sectores de los lotes conocidos como manchones, comprometiendo la rentabilidad de los sistemas. Miretti *et al.* (2008) evaluaron en un Argiudol ácuico situado próximo a la localidad de Humboldt, en áreas normales (AN) y con manchones (AM), si el estrés efectivo (σ), variable que combina el efecto del potencial hídrico del suelo y el contenido de humedad, afecta diferencialmente la resistencia a la penetración del suelo (RP) en AN y AM. Los autores encontraron una relación lineal entre RP y σ . σ explicó el 65% y 78% de la variabilidad total de RP para áreas normales y manchones, respectivamente. El incremento de RP con el secamiento del suelo fue significativamente mayor en AM que en AN debido a las diferencias de Ds. Se concluyó que en los manchones el suelo presenta mayor densificación. Esa densificación determina condiciones de mayor estrés efectivo y mayor RP en los manchones, generando condiciones físicas más restrictivas para el desarrollo de las plantas de alfalfa. Miretti *et al.* (2012) extrajeron muestras con estructura no perturbada en cada sitio para el cálculo del IHO y densidad del suelo (Ds). En ambas áreas, el aumento de Ds aumentó el valor de θ en que la resistencia a la penetración se torna limitante (θ_{RP}) y disminuyó el valor de θ en que la porosidad de aeración comienza a ser restrictiva. θ_{RP} fue el límite inferior del IHO en AM y AN, indicando que el creci-

miento de las plantas estuvo limitado por la resistencia a la penetración antes de que el valor de θ llegue al punto de marchitez permanente. El IHO promedio fue reducido ($0,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) en ambos casos, pero AM registró mayor número de casos con $D_s > D_s$ crítica (7% vs. 27%), indicando mayor densificación en AM. Situación similar se verificó en el subsuelo. Miretti *et al.* (2012) en el mismo ensayo determinaron el indicador “días de estrés por falta o exceso de agua” (WSD). WSD, que pondera numéricamente los períodos en que θ está fuera del IHO, resultó mayor en AM (|134| vs. |145|). Las condiciones físicas del suelo fueron más limitantes en AM, pudiendo ocasionar muerte prematura de plantas en los manchones. La tasa de disminución del número de plantas fue significativamente mayor en AM ($R^2= 0,92$) y la producción de materia seca fue significativamente mayor en AN ($R^2=0,88$).

En general, en la provincia se observa un gran deterioro de la condición física de los suelos por acidificación y disminución del contenido de materia orgánica, lo que ha llevado a realizar investigaciones para lograr recuperar su calidad. Dado que en la región se encuentran muchos establecimientos lecheros y ganaderos, varios trabajos han sido orientados a utilidad los materiales orgánicos disponibles (efluentes de tambo, barrido de corrales) y corrección de la acidez.

Imhoff *et al.* (2010) aplicaron diferentes dosis de efluente de tambos sobre un Argiudol típico para determinar su efecto sobre las propiedades físicas. En 9 parcelas, en las que se aplicó $T0= 0 \text{ L ha}^{-1}$, $T80= 80.000 \text{ L ha}^{-1}$ y $T160= 160.000 \text{ L ha}^{-1}$ de efluente, se midió la conductividad hidráulica (K) a las tensiones de 0, 0,15 y 0,3 kPa con infiltrómetros de tensión y calculó el flujo de agua. Los resultados se muestran en la **Tabla 12** y **13**. En muestras con estructura inalterada se determinó la distribución de agregados por tamaño (DA) y el diámetro medio geométrico (DMG).

Tabla 12. Valores medios de conductividad hidráulica (K) para las diversas dosis de efluentes aplicadas.

Table 12. Mean values of hydraulic conductivity (K) for the various doses of effluents applied.

| Tensión (kPa) | T0 K (mm h ⁻¹) | T80 K (mm h ⁻¹) | T160 K (mm h ⁻¹) |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 14,9 b | 25,1 a | 23,9 a |
| 0,15 | 14,3 b | 17,1 a | 17,0 a |
| 0,3 | 14,9 a | 12,8 a | 13,0 a |

Letras distintas en las líneas indican diferencias significativas ($p<0,05$) ($T0=0\text{L ha}^{-1}$; $T80=80.000\text{L ha}^{-1}$; $T160=160.000\text{L ha}^{-1}$).

K fue significativamente más elevada en el suelo que recibió efluente indicando mayor capacidad de conducir agua por poros de gran tamaño y con el suelo saturado.

Tabla 13. Variables hidráulicas medidas en el suelo luego de la aplicación de diferentes dosis de efluente.

Table 13. Hydraulic variables measured in the soil after the application of different doses of effluent.

| Variables hidráulicas | T0 | Tratamientos T80 | T160 |
|-----------------------|-----|---------------------|------|
| % flujo (0-0,15) | 4,2 | 31,8 | 29,1 |
| % flujo (0-0,3) | 0,2 | 49,1 | 45,8 |
| % Dflujo (0-0,15) | | 92,2 | 91,1 |
| % DK0 | | 40,7 | 37,7 |

%flujo= porcentaje de flujo; %Dflujo= diferencia de flujo; %DK0 diferencia de conductividad hidráulica saturada. $T0= 0\text{L ha}^{-1}$; $T80= 80.000\text{L ha}^{-1}$; $T160= 160.000 \text{ L ha}^{-1}$.

El flujo de agua que ocurrió por poros de radio entre 1000 y 500 μm fue 17,3 % y 16,7 % mayor en T80 y T160 que en T0. En el suelo con efluente la capacidad de conducción de los poros de radio mayor a 1000 μm superó en más de 90% a la medida en T0. La adición de efluente no alteró significativamente DA ni DMG, que osciló en torno de 5 mm. La fracción con agregados de 1-8 mm predominó (56,5%), aunque también hubo elevada proporción de agregados menores a 1mm (34,6%). La aplicación de efluente contribuyó a mejorar la trama porosa del suelo, y aumentó la capacidad de infiltración y de conducción de agua por bioporos y macroporos.

Imhoff *et al.* (2014) realizaron un ensayo en un Argiudol ácuico para determinar el efecto de la aplicación de diversas dosis de efluentes líquidos de tambo (ELT) sobre la resistencia mecánica (RP) y el estrés efectivo del suelo (σ). En el lote se establecieron parcelas (12) de 20m de largo por 3m de ancho con cuatro tratamientos (dosis de efluente): $0\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ (T), $60\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ (D1), $120\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ (D2) y $180\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ (D3). Se verificó un aumento del contenido de materia orgánica y de los nutrientes en el espesor 0-5 cm, permaneciendo inalterados los valores de 5-20 cm. Hubo una relación lineal positiva entre RP- σ **Figura 7** . Los tratamientos D2 y D3 presentaron valores de RP menores que T y D1 a igual valor de σ , y menor Ds. En D2 y D3 los valores de RP permanecieron por debajo del valor crítico (2 MPa) en todo el rango de σ evaluado, mientras que en T y D1 superaron ese valor a valores bajos de σ (20 kPa).

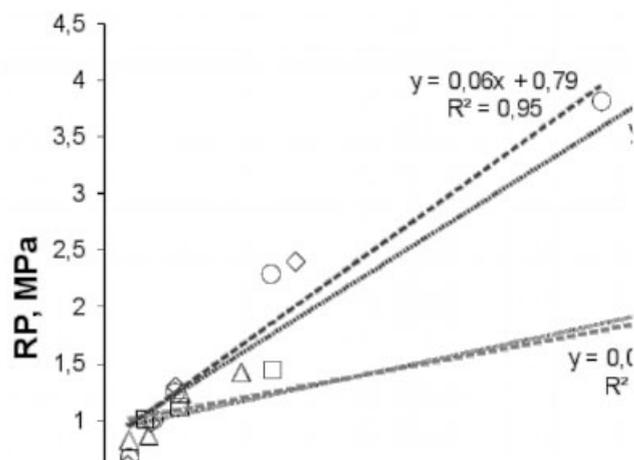


Figura 7. Relación entre el estrés efectivo (σ) y la resistencia a la penetración (RP) en los tratamientos de aplicación de efluentes de tambo: T: testigo ($0\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$); D1: dosis baja ($60\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$); D2: dosis media ($120\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$); D3: dosis alta ($180\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$).

Figure 7. Relationship between effective stress (σ) and resistance to penetration (RP) in treatments for the application of dairy effluents: T: control ($0\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$); D1: low dose ($60\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$); D2: average dose ($120\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$); D3: high dose ($180\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$).

El ELT en las dosis más elevadas modificó positivamente las condiciones físicas del suelo, probablemente debido al efecto positivo de la materia orgánica y cationes bivalentes sobre la agregación del suelo, mostrando ser una alternativa para mejorar su calidad para el desarrollo de los cultivos.

Masola *et al.* (2014) y Masola *et al.* (2016) realizaron un estudio determinar el efecto del nochero y la aplicación de carbonato de calcio sobre propiedades físicas y químicas del suelo. El nochero es una práctica que consiste en encerrar los animales en parcelas reducidas donde pasan la noche y se le suministra alimento (forraje, concentrado). El trabajo fue realizado en el establecimiento en la localidad de Sa Pereira, en un Argiudol ácuico, serie Pilar. Los tratamientos consistieron en un testigo (T) sin aplicación de enmiendas; nochero (N); nochero+corrección (NC). Para constituir el tratamiento N se utilizaron las

parcelas durante 15 días consecutivos como nochero durante 2 ciclos rotativos. Para tratamiento NC se realizó el mismo manejo que el anterior y al finalizar el segundo ciclo se incorporaron 1850 kg ha⁻¹ de carbonato de calcio. Luego de la aplicación de la enmienda calcárea se sembró un cultivo de avena. Se evaluó estabilidad estructural (EE), resistencia mecánica (RP), densidad del suelo (Ds), el intervalo hídrico óptimo (IHO) y las propiedades químicas. Los resultados se presentan en las **Tablas 14** y **15**.

Tabla 14. Valores promedios de densidad de suelo (Ds), resistencia a la penetración (RP), estabilidad de agregados (DMP) e intervalo hídrico óptimo para los tratamientos testigo (T), nochero (N) y nochero+encalado (NC).

Table 14. Average values of soil density (Ds), penetration resistance (RP), aggregate stability (DMP) and optimum water interval for the control (T), nighttime (N) and nighttime + liming (NC) treatments.

| Tratamiento | Ds (g cm ⁻³) | RP (MPa) | Estabilidad de agregados (DMP, mm) | | | IHO (cm cm ⁻³) |
|-------------|--------------------------|----------|------------------------------------|--------|---------|----------------------------|
| | | | RH | RM | LH | |
| T | 1,36 b | 2,05 b | 0,46 a | 2,09 a | 1,43 ab | 0,04 b |
| N | 1,16 a | 0,75 a | 0,80 a | 2,29 a | 2,24 a | 0,11 a |
| NC | 1,16 a | 0,51 a | 0,82 a | 2,11 a | 2,52 a | 0,12 a |

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($\alpha = 5\%$)

Tabla 15. Caracterización química del suelo estudiado luego de la aplicación de los tratamientos testigo (T), nochero (N) y nochero+encalado (NC).

Table 15. Chemical characterization of the soil studied after the application of the control (T), nighttime (Nt) and nighttime + liming (NC) treatments.

| Parámetro | T | N | NC |
|--|------|------|------|
| Materia orgánica (%) | 3,18 | 4,51 | 3,81 |
| Nitrógeno total (%) | 0,17 | 0,25 | 0,20 |
| Fósforo extractable (ppm) | 11 | 67 | 48 |
| Azufre de sulfatos (ppm) | 9 | 24 | 30 |
| pH actual | 5,4 | 5,8 | 6 |
| Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹) | 0,5 | 0,9 | 0,8 |
| Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹) | 6,5 | 8,2 | 9,5 |
| Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹) | 1,3 | 2,1 | 1,5 |
| Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹) | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹) | 1,2 | 1,9 | 1,9 |
| CIC (cmol _c kg ⁻¹) | 12,2 | 14,3 | 14,5 |

El ensayo demostró que el uso del nochero y nochero+encalado permitió mejorar las propiedades químicas y disminuir la compactación del suelo, lo cual aumentó notablemente el IHO.

Carrizo *et al.* (2014) realizaron un ensayo en un suelo franco (Typic Hapludol) y un suelo limoso (Typic Argiudoll) en condiciones controladas durante 112 días con los siguientes tratamientos: (i) con y sin crecimiento de plantas de trigo y (ii) con y sin adición de residuos de trigo. Se evaluó la estabilidad estructural (EE) del suelo, el contenido de carbono orgánico total y particulado, glomalina y carbohidratos. En general, la adición de residuos y la presencia de plantas con raíces activas aumentaron la presencia de todos los agentes de agregación y disminuyeron los procesos de destrucción de agregados en ambos suelos. Los carbohidratos solubles y las proteínas relacionadas con la glomalina fueron los agentes agregantes más importantes y su función fue reducir la

magnitud de los mecanismos de estallido, ruptura mecánica y la microfisuración, evidenciando un mayor impacto en el suelo limoso.

Estado de compactación general de suelos de la Provincia de Santa Fe

A nivel general de la provincia de Santa Fe Ghiberto *et al.* (2015) e Imhoff *et al.* (2016) han evaluado diversos indicadores de la calidad física de los suelos más productivos (Argiudoles típicos, Argiudoles ácuicos, Hapludoles).

Ghiberto *et al.* (2015) evaluaron las curvas de retención hídrica e indicadores del estado del sistema poroso en 60 horizontes A y B. Estos horizontes presentaron amplia variación en la textura, contenido de materia orgánica y densidad de suelo debido a que estaban bajo diferentes sistemas de uso. La porosidad total varió de 43% a 0,57 %; la macroporosidad (Ma) (diferencia de contenido hídrico a saturación menos contenido hídrico a 1kPa de tensión) fue en promedio 3% para horizontes A y 1% para los horizontes B mientras que la capacidad de aeración (CA) (diferencia de contenido hídrico a saturación menos contenido hídrico a 10kPa de tensión) fue 12% y 6%, respectivamente. El índice de estabilidad (IS) fue alrededor de 3% y 1,5 % en horizontes A y B, respectivamente, inadecuado en ambos casos (valor adecuado > a 9%). El análisis de los indicadores permitió separar los suelos de la provincia en cuatro grupos. Los suelos del grupo 1) se caracterizan por su excelente calidad estructural (sin compactación): Ma >7%, CA>15%, IS>9%. En el grupo 2 los valores fueron: Ma 4-7%, CA>15%, IS 7-9%. En el grupo 3 se obtuvo Ma <4%, CA<15%, IS 5-7%. En el grupo 4 se agruparon principalmente los horizontes B, con valores de Ma <4%, CA<10%, IS<5. Estos indicadores muestran que la mayoría de los suelos de la provincia, exceptuando aquellos con más de 15% de arena, más de 3% de materia orgánica y/o densidad de suelo menor a 1,3 g cm⁻³, no poseen adecuada capacidad para drenar rápidamente el exceso de agua. El elevado contenido de limo, la pérdida de materia orgánica y la compactación que han sufrido estos suelos, que se manifiesta en valores elevados de densidad del suelo (>1,3 g cm⁻³), se consideran los agentes causales de dicha condición.

En las mismas situaciones Imhoff *et al.* (2016) recogieron muestras de suelo para determinar la textura, el contenido de materia orgánica (MO), la densidad del suelo (Ds), la curva de retención de agua (CRH: contenido hídrico (θ) en función del potencial mátrico (ψ)), la resistencia del suelo a la penetración (RP), el intervalo hídrico óptimo (IHO), la densidad de suelo crítica (Dsc) para el crecimiento de las plantas, y el índice de compresión (IC, también llamado susceptibilidad a la compactación), la presión de preconsolidación (σ , máxima presión que puede ser aplicada al suelo sin causar compactación adicional) y la compresibilidad de los suelos (valor de Ds alcanzada cuando se aplica determinado estrés al suelo) a partir de las curvas de compresión.

La ecuación obtenida para $\theta=f(\Psi)$ fue:

$$\ln\theta=-0,75+0,02,\ln\text{arc}+0,04,\ln\text{MO}+(-0,35+0,07,\ln\text{arc}),\ln\psi$$

La ecuación obtenida para $\text{RP}=f(\text{Ds}; \theta)$ fue:

$$\ln\text{RP}=-4,88-0,02,\text{arc}+0,42,\text{MO}+(-0,17-0,05,\text{arc}),\ln\theta+5,6,\text{Ds}$$

Las funciones de edafotransferencia obtenidas permiten estimar el IHO.

La ecuación obtenida para la Dsc (g cm⁻³) para el crecimiento de las plantas fue:

$$Dsc=2,68,arc^{-0,17};$$

La ecuación obtenida para el índice de compresión (IC) fue:

$$IC=0,43+0,12,Lnq_g-0,13,Ds+0,05,Ln(arc+Li)-0,08,LnMO$$

La ecuación obtenida para la presión de preconsolidación (σ , kPa) fue:

$$\sigma=-402,8+64,5,LnMO+45,3Lnarc-250,9,Lnq_g$$

MO=% materia orgánica; arc=% arcilla; Li= % limo; q_g = contenido gravimétrico de humedad.

Las funciones desarrolladas proporcionan una herramienta útil para determinar el impacto que las operaciones mecánicas del suelo pueden tener sobre las propiedades físicas que afectan el desarrollo de los cultivos para los suelos más productivos de la provincia de Santa Fe.

■ REFERENCIAS

- Buttarelli, M. 2008. Crecimiento y desarrollo de la parte aérea del cultivo de soja en suelos limosos compactados diferentemente. Tesis de grado, Universidad Nacional del Litoral. [Esperanza, Argentina].
- Carrizo, ME; A Alesso; MJ Masola; S Gambaudo & S Imhoff. 2014. Resistencia ténsil en Hapludoll y Argiudoll cultivados con trigo y residuos de cosecha en invernadero. *En: Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Río Cuarto.*
- Cerana, LA. 1978. La resistencia mecánica de los suelos y el crecimiento de los tallos subterráneos y raíces. Facultad de Edafología, Universidad Católica de Santa Fe.
- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 20: 201-214.
- Ghiberto, P; A Grioni; JP Gay & S Imhoff. 2006. Uso de infiltrómetro de tensión para detectar alteraciones en la trama porosa de Argiudoles. *En: Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta. (En CD).*
- Ghiberto, P; S Imhoff; P Libardi; A Pires da Silva; C Tormena & M Pilatti. 2012. Soil quality of Mollisols quantified by the pore size distributions. *En: 19th ISTRO, Montevideo. (En conferencia).*
- Ghiberto, P; S Imhoff; P Libardi; A Pires da Silva; CA Tormena & M Pilatti. 2015. Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Sci. Agr.* 72: 167-174.
- Grioni, A; JP Gay; MC Miretti & S Imhoff. 2006. Efecto del tránsito de maquinaria en la compactación del suelo. *En: Actas del X Encuentro de Jóvenes Investigadores de la Universidad Nacional del Litoral y I Encuentro de Jóvenes Investigadores de Universidades de Santa Fe, Santa Fe. (En CD).*
- Gupta, SC & RR Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Advances in Soil Science* 6: 65-100.
- Imhoff, S; JP Gay; A Grioni & P Ghiberto. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fe determinada por medio del intervalo hídrico óptimo. *En: Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta. (En CD).*
- Imhoff, S; H Imvinkelried; CA Tormena & A Pires da Silva. 2009. Calificación visual a campo de la calidad estructural de Argiudoles bajo diferentes sistemas de manejo. *Ciencia del Suelo* 27(2): 247-253.
- Imhoff, S; MC Miretti; M Butarelli & H Imvinkelried. 2010. Eficiencia del indicador S para diferenciar estados de deterioro estructural inducido por tránsito de maquinaria agrícola. *En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.*
- Imhoff, S; R Martel; V Lotto & MC Miretti. 2010. Influencia de efluentes líquidos de tambo sobre la fertilidad física del suelo. *En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.*
- Imhoff, S; S Tomatis; P Fernández & P Ghiberto. 2014. Relación estrés efectivo-resistencia mecánica en suelos abonados con efluentes líquidos de tambo. *En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca.*

- Imhoff, S; A Pires da Silva; P Ghiberto; CA Tormena; M Pilatti & P Libardi. 2016. Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. *Plos One* 1-21.
- Imvinkelried, H; S Imhoff; M Butarelli & M Pietrobon. 2009. Respuesta de los componentes del rendimiento del cultivo de soja a la compactación del suelo. *En: V Congreso Brasileiro de Soja, Goiania, Brasil.*
- Imvinkelried, H; S Imhoff & M Butarelli. 2010. Respuesta del rendimiento y parámetros del crecimiento del cultivo de soja a la compactación del suelo. *En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.*
- Imvinkelried, H; M Pietrobon & S Imhoff. 2014. Labor vertical sobre productividad de agua y radiación en una secuencia agrícola. *En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca.*
- Marano, R; H Micheloud & S Imhoff. 2006. Influence of no-till on hydrophysical properties of Argiudols of the center of Santa Fe – Argentina. *En: 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, Pennsylvania, USA.*
- Marano, RP. 2014. Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (*Oryza sativa* L.) visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio. Tesis de Doctorado, Universidad de São Paulo. [Piracicaba, Brasil].
- Martel, R & S Imhoff. 2009. Evaluación de la conductividad hidráulica de un suelo sometido a tres dosis de efluentes líquidos de tambo. *En: Actas del XIII Encuentro de Jóvenes Investigadores de la UNL. IV Encuentro de Jóvenes Investigadores de Universidades de Santa Fe, Santa Fe.*
- Masola, MJ; S Imhoff; ME Carrizo; CA Alesso & S Gambaudo. 2014. Evolución de propiedades físicas con la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas. *En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca.*
- Masola, MJ; ME Carrizo; CA Alesso & S Imhoff. 2016. Cambios en las propiedades químicas e intervalo hídrico óptimo de un Argiudol por la aplicación de enmiendas. *En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Río Cuarto.*
- Miaczynski, CRO & M Tschapek. 1965. Los suelos de estepa de la región pampeana. *RIA Clima y Suelo* 2: 35-79.
- Mieres, L & E Lorenzini. 2014. Efecto del sistema de labranza sobre fracciones carbonadas de un suelo del Chaco húmedo santafesino. *En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca.*
- Mieres, L. 2017. Agricultura Intensificada en siembra directa y convencional en el norte de Santa Fe. *En: Ensayos de Larga Duración en Argentina: Un aporte al logro de Sistemas Agrícolas Sustentables.* Ediciones INTA (En edición).
- Miretti, MC; G Poi & S Imhoff. 2008. Relación estrés efectivo-resistencia mecánica de un Argiudol en manchones y áreas normales de alfalfares de Santa Fe. *En: Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis.* (En CD).
- Miretti, MC; S Imhoff & A Pires da Silva. 2009. Manchones improductivos de alfalfa: influencia de las propiedades físicas y químicas de un Argiudol del centro de Santa Fe. *En: Actas del X Congreso de Ingeniería Rural y II del Mercosur, Rosario.* (En CD).
- Miretti, MC; S Imhoff; A Pires da Silva & SR Lavado. 2010. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields in Santa Fe. *Sci. Agr.* 67: 604-610.
- Miretti, MC; S Imhoff; R Marano & A Pires da Silva. 2012. Desarrollo de la alfalfa en ambientes con y sin manchones. *En: XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.* (En CD).
- Orellana, JA de. 1988. Mezcla de horizontes: composición granulométrica y estructura. *Revista Fave* 4(1-2): 70-79.
- Orellana, JA de & JM Diez. 1988. Efecto de bajas dosis de cal sobre propiedades mecánicas del B2t de un Argiudol. *Revista FAVE* 4(1-2): 80-91.
- Orellana, JA de. 1989. Expansibilidad y penetrabilidad de un horizonte B2t con enmiendas cálcicas. *Ciencia del Suelo* 7(1-2): 107-111.
- Orellana, JA de. 1990. Impedimentos mecánicos al desarrollo vegetal: costras, pisos de arado y horizontes texturales. *Revista FAVE* 4(1-2): 1-16.
- Orellana, JA de & MA Pilatti. 1990. Aplicación de enmiendas cálcicas en un horizonte B2t. *Ciencia del Suelo* 8(2): 127-139.
- Orellana, JA de; MA Pilatti & D Grenón. 1997. Soil Quality: an approach to the physical state assessment. *J. Sustain. Agr.* 9(2-3): 91-108.

- Orellana, JA de & MA Pilatti. 1999. The ideal soil: I. An edaphic paradigm for sustainable agricultura. *J. Sustain. Agr.* 15(1): 47-59.
- Pilatti, MA & RL Antille. 1985. Labores profundas en Argiudoles del noreste santafecino. Incidencia sobre las propiedades edáficas y comportamiento del girasol. *TecniCREA* 5: 16-22.
- Pilatti, MA; LJJ Priano & JA de Orellana. 1987. Modificaciones producidas en el suelo por plantas forrajeras. *Ciencia del Suelo* 5(2): 150-157.
- Pilatti, MA; JA de Orellana; LJJ Priano; O Felli & D Grenón. 1988. Manejos tradicionales y conservacionistas: Incidencia sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estudio de casos sobre Argiudoles del sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6 (2): 19-29.
- Pilatti, MA & JA de Orellana. 2000. The ideal soil. II: Critical values of the ideal soil, for Mollisols in the North of the Pampean Region (In Argentina). *J. Sustain. Agr.* 17(1): 89-111.
- Pilatti, MA; JA de Orellana & O Felli. 2003. The ideal soil: III fitness of edaphic variables to achieve sustenance in agroecosystems. *J. Sustain. Agr.* 22(2): 109-132.
- Pilatti, MA & O Felli. 2004. La sodificación en la agregación e infiltración del sello del horizonte A en Molisoles de Santa Fe. *En: Actas del XIX Congreso XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis.* (En CD).
- Pilatti, MA; D Grenón, JA de Orellana & S Imhoff. 2006. Global Interactive Index for Soil Production and Degradation Assessment. *En: 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, Pennsylvania, USA.*
- Pilatti, MA; O Felli; S Imhoff; R Marano & A Alesso. 2009. Cambios en un Argiudol típico del centro este de Santa Fe con siembra directa: 2) propiedades físicas. *En: Actas del X Congreso de Ingeniería Rural y II del Mercosur, Rosario.* (En CD).
- Pilatti, MA & JA de Orellana. 2012. Suelos ideales para agricultura sostenible. *Revista FAVE* 11(1): 65-88.
- Pilatti, MA; JA de Orellana; S Imhoff & Á Pires da Silva. 2012. Revisión de los límites críticos del Intervalo Hídrico Óptimo (IHO). *Ciencia del Suelo* 30(1): 9-21.
- Pilatti, MA; S Imhoff & R Gagliardi, 2014. Manchones en alfalfares: Posibles causas. Plan para diagnosticar y tratar. Informe para grupo CREA.
- Piñeiro, A & JL Panigatti. 1964. Aspectos del uso y conservación del suelo en el Dpto. Castellanos (Prov. Santa Fe). *IDIA Supl.* 13: 47-53.
- Piñeiro, A & JL Panigatti. 1972. Aspectos de la conservación del agua en el suelo Brunizem modal y sus fases dominantes en áreas del Dpto. Castellanos de la provincia de Santa Fe. *IDIA* 293: 5-31.
- Piñeiro, A & JL Panigatti. 1972. Génesis de un suelo Planosol. *Rev. Inv. Agr. Ser.* 9: 1-28.
- Piñeiro, A; MA Pilatti & D Mistrorigo. 1982. Degradación del recurso natural suelo y la consecuente disminución de la productividad de la región noreste de Santa Fe. *Dir. Gral. de Ext. e Invest. Agrop.* 42 pp.
- Sandoval, P. 1984. Exploración de deficiencias nutritivas en suelos de la Unidad Demostrativa de producción de Leche de Esperanza (UDPELE). Tesis de grado, Universidad Nacional del Litoral. [Esperanza, Argentina].
- Soane, BD & C Van Ouwerkerk. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, BD & C Van Ouwerkerk (Ed). *Soil Compaction in Crop Production*, Amsterdam: Elsevier, .1-21 pp.
- Vidal, C. 2006. Evaluación de la aptitud de las tierras para riego por aspersión en el Noreste Santafesino. Tesis de especialista en Riego de Tierras Agrícolas, Universidad Nacional del Litoral. [Esperanza, Argentina].
- Vidal, CM & V Aparicio. 2008. Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de suelos provenientes del desmonte en el norte de Santa Fe. *En: Actas del XIX Congreso XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis.* (En CD).
- Zaffanella, M & M Gemesio. 1966. Limitaciones del suelo de pergamino para lograr altos rendimientos maiceros sugeridas por el estudio de estudios estadounidenses similares. *Informaciones Técnicas* 54: 13 pp.
- Zen, O; S Imhoff; S Gambaudo; H Fontanetto & R Martel. 2009. Identificación de ambientes homogéneos de manejo mediante indicadores de calidad física y química de suelos. *En: Actas del X Congreso de Ingeniería Rural y II del Mercosur, Rosario.* (En CD).