



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**

Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo

Modalidad: Proyecto.

**“DESCOMPACTACIÓN SUBSUPERFICIAL: EFECTO SOBRE
INDICADORES FÍSICO-BIOLÓGICOS DEL SUELO Y EL
RENDIMIENTO DE MAÍZ”**

Alumno: Ghigo, Matías

DNI: 35.280.000

Directora: Cholaky, Carmen

Río Cuarto – Córdoba

Agosto/2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: Descompactación subsuperficial: Efecto sobre indicadores físico-biológicos del suelo y el rendimiento del maíz.

Autor: Matías Ghigo

DNI: 35280000

Director: Carmen Cholaky

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión
Evaluadora:

(Nombres) _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por el apoyo incondicional en todos estos años.

A mis amigos de siempre y mis amigos de la Universidad por su ayuda constante.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto y a todos los docentes de la carrera.

A Leonardo Bergesio y a su familia por brindar su establecimiento, apoyo y atención en todo momento.

A mi directora de tesis Carmen Cholaky por su tiempo, dedicación y conocimiento para la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Planteo del problema.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Hipótesis.....	8
1.4 Objetivos.....	8
Capítulo 2: Materiales y métodos.....	9
2.1 Área de estudio.....	9
2.2 Tratamientos y diseño experimental.....	10
2.3 Evaluaciones.....	11
2.4 Análisis estadístico de los resultados.....	16
Capítulo 3: Resultados y discusiones.....	17
3.1 Caracterización del perfil cultural en los dos sistemas de labranza analizados.....	17
3.2 Evaluación de las variables físicas y biológicas.....	19
3.2.1 Resistencia mecánica.....	19
3.2.2 Densidad aparente actual del suelo.....	22
3.2.3 Densidad aparente máxima del suelo y humedad óptima.....	23
3.2.4 Susceptibilidad a la compactación del suelo.....	24
3.2.5 Compactación relativa.....	25
3.2.6 Velocidad de infiltración.....	26
3.2.7 Número de lombrices.....	27
3.3 Rendimiento del cultivo.....	28
3.4 Modelo COMPACTA FACE II.....	29
Capítulo 4: Conclusiones.....	33
Capítulo 5: Bibliografía.....	34
Anexos.....	42

ÍNDICE DE TABLAS, GRÁFICOS Y FIGURAS.

TABLAS

Tabla 1: Escala de compactación y recomendación de descompactación mecánica del modelo COMPACTA FACE II.....	15
Tabla 2: Distribución de la resistencia mecánica del suelo de acuerdo a la profundidad y el sistema de labranza utilizado.....	20
Tabla 3: Distribución de la densidad aparente del suelo de acuerdo a la profundidad y el sistema de labranza utilizado.....	22
Tabla 4: Susceptibilidad a la compactación del suelo bajo estudio en las dos profundidades analizadas.....	24
Tabla 5: Distribución del porcentaje de compactación relativa del suelo de acuerdo a la profundidad y el sistema de labranza utilizado.....	26
Tabla 6: Distribución de la velocidad de infiltración del suelo de acuerdo al sistema de labranza utilizado.....	27
Tabla 7: Distribución del número de lombrices en los distintos tratamientos.....	28
Tabla 8: Rendimiento del cultivo (qq/ha) en los dos tratamientos.....	29
Tabla 9: Índice de tránsito agrícola para cada uno de los implementos utilizados en el tratamiento de SD (Siembra directa).....	30
Tabla 10: Datos generales considerados para las corridas realizadas en el modelo Compacta Face II.	30
Tabla 11: Tipo de rotaciones utilizadas en las distintas corridas del modelo Compacta Face II.	31

GRÁFICOS

Gráfico 1: Perfil de distribución de agua en el suelo para los tratamientos de **SD** (Siembra directa) y **SDD** (Siembra directa con una labor de descompactación previa).

.....21

Gráfico 2: Curvas de **PEA** y contenido hídrico del suelo para las dos profundidades analizadas.

.....23

FIGURAS

Figura 1: Ubicación del sitio experimental.....9

Figura 2: Profundidad efectiva alcanzada por la labor en el tratamiento **SDD** (Siembra directa con una labor de descompactación previa)..... 17

Figura 3: Perfil del tratamiento bajo **SD** (Siembra directa).....18

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

SD: Siembra directa.

SDD: Siembra directa con una labor de descompactación previa.

RM: Resistencia mecánica.

DA: Densidad aparente actual.

VI: Velocidad de infiltración.

HG: Humedad gravimétrica.

PEA: Peso específico aparente.

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de una labor de descompactación sobre indicadores físico-biológicos y sobre el rendimiento del cultivo de maíz. El estudio se realizó en cercanías de la localidad de Bulnes, (33°30'51,56" S; 64°40'35,48" O) Córdoba, Argentina durante el período 2013-2014. Los tratamientos comprendieron dos sistemas de labranza: siembra directa (**SD**) y siembra directa con una labor de descompactación subsuperficial previa, utilizando un subsolador alado (**SDD**). Las variables analizadas fueron: perfil cultural, resistencia mecánica (**RM**), densidad aparente actual (**DA**), velocidad de infiltración (**VI**), número de lombrices y rendimiento en granos de un cultivo de maíz (*Zea mays. L*). Se evaluó además el modelo Compacta Test, como estimador de la necesidad de descompactación edáfica. El diseño experimental fue completamente aleatorizado, con cuatro repeticiones espaciales. El perfil cultural de **SDD** se mostró más fragmentado que **SD**, presentando bloques más pequeños y fácilmente discernibles. La **RM** fue mayor en **SD** con respecto a **SDD** en todas las profundidades analizadas, pero solo se encontraron diferencias significativas en los primeros 20 cm. La **DA** también fue mayor en **SD**, resultando diferente estadísticamente a **SDD** en la primera profundidad evaluada (0- 13 cm). **VI** y número de lombrices no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, pero el tratamiento **SDD** presentó una **VI** mayor que **SD**. Una de las corridas del modelo Compacta Test, indicó innecesaria la labor de descompactación, aunque el modelo no considera rotaciones agrícola- ganaderas, correspondiente a la historia de uso del lote donde se implementó el presente ensayo. La labor de subsolado del perfil tuvo un efecto importante sobre las variables físico-biológicas analizadas, sin embargo ocasionó un impacto mínimo sobre el rendimiento del cultivo de maíz para las condiciones de clima- suelo que prevalecieron durante el período de estudio.

Palabras clave: Siembra directa, descompactación, densidad aparente actual, resistencia mecánica, rendimiento.

SUMMARY

The objective was to evaluate the effect of a work of decompacting on physical-biological and the corn crop yield indicators. The study was conducted in the vicinity of the town of Bulnes, (33 ° 30'51, 56 "S, 64 ° 40'35, 48" O) Cordoba, Argentina during 2013-2014. Treatments comprised two tillage systems: tillage (**SD**) and direct seeding with previous work using a winged Subsurface decompacting subsoiler (**SDD**). The variables analyzed were: cultural profile, mechanical strength (**RM**), apparent current density (**DA**), infiltration rate (**VI**), number of worms and grain yield of maize (*Zea mays* L.). Compact Test model was also assessed, as an estimate of the need for soil decompacting. The experimental design was completely randomized, with four spatial replicates. The cultural profile of **SDD** was more fragmented than **SD**, presenting smaller and easily discernible blocks. MRI was greater in **SD** regarding **SDD** in all analyzed depths, but only significant differences in the first 20 cm are found. The **DA** was also higher in **SD**, resulting **SDD** statistically different in the first depth evaluated (0- 13 cm). **VI** and number of worms did not differ between treatments, but the **SDD** treatment presented a **VI** greater than **SD**. One of the model Compact Test runs, said decompacting unnecessary work, although the model does not consider agricultural-livestock rotations, corresponding to the history of use of the lot where this test was implemented. The work of subsoiling profile had a significant effect on the physical and biological variables analyzed, however caused minimal impact on crop yield of corn for soil climatological conditions that prevailed during the study period.

Keywords: Direct seeding, decompacting, apparent current density, mechanical strength, performance.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteo del problema

El crecimiento sostenido de la superficie agrícola en detrimento de las actividades ganaderas, ha generado cambios en los sistemas productivos con intensificación en el uso del recurso suelo (Martínez *et al.* 2008).

En los últimos treinta años se han introducido importantes innovaciones en los métodos de labrar la tierra. Muchas de estas innovaciones surgen como respuesta a condiciones económicas que obligan a los agricultores a adoptar técnicas de laboreo que contemplen una reducción de los costos de producción. Sumado a este argumento económico, el desarrollo de nuevos equipos y la irrupción en el mercado de los herbicidas de acción total, que permiten controlar las malezas sin necesidad de labrar, también han jugado un papel importante en la aparición de estos métodos de labranza. Una característica común en todos estos sistemas de laboreo es la sustitución del laboreo convencional, con el arado de vertedera, por otras formas de labranza que reducen la intensidad con la que se trabaja el suelo y que, además, mantienen en mayor o menor medida los restos de las cosechas sobre el terreno. Surgen así los sistemas de laboreo mínimo y siembra directa (SD) que, al depender en gran medida de los herbicidas para controlar las malezas, permiten al agricultor preparar el terreno para la siembra con un número reducido de labores (Cerisola *et al.* 2000).

Este rápido crecimiento y avance de la agricultura en SD no se realizó sobre la base de estudios detallados sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, o su evolución en el tiempo, sino que fue consecuencia de la expansión del cultivo de soja (*Glicine max L.*) en toda la región agrícola del país, por cuestiones económicas y de simplicidad de producción (Kiessling *et al.* 2008).

La SD ha solucionado problemas de erosión de suelos a algunos ambientes, pero ha generado inconvenientes como la densificación de los horizontes superficiales donde se sustenta la producción (Soza *et al.* 2008).

La compactación del suelo produce un aumento en su densidad aparente (DA), aumenta su resistencia mecánica, destruye y debilita su estructura, reduciendo la porosidad total. Esta reducción

produce una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas, debido a la pérdida de ésta por escurrimiento superficial y disminuye la actividad bioquímica y microbiológica del suelo. Al mismo tiempo, produce una falla en la implantación de los cultivos, debido a que las raíces tienen más dificultad en penetrar en el suelo y por lo tanto un acceso reducido al agua y los nutrientes. Todo esto se traduce en un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y, por lo tanto de su parte aérea, lo que se manifiesta en una menor producción (Kiessling *et al.* 2008).

Densidad aparente (DA) y resistencia a la penetración son determinaciones usuales en estudios de compactación. El establecimiento de niveles críticos de DA provee una herramienta útil para el monitoreo de la condición estructural del suelo. Esto resulta de especial importancia en aquellos sistemas de producción donde la compactación puede ser un problema latente (ej: Siembra directa en sistemas ganaderos) (Venanzi *et al.* 2001).

Según Hidalgo *et al.* (2010), el tránsito de maquinarias agrícolas es el principal causante de la compactación, afectando la producción. Estudios sobre maíz (*Zea mays* L.) concluyen que las plantas sobre las huellas del tractor tuvieron un 10% menos de emergencia y una reducción del 1% en rendimiento, con respecto a las que estuvieron fuera de las huellas, con una disminución de 1300 kg/ha causada por las cubiertas de cosechadoras en un rendimiento promedio de 9000 kg/ha.

En la Argentina, los suelos de la Pampa Ondulada se caracterizan por presentar una alta susceptibilidad a sufrir procesos de degradación física, debido fundamentalmente a su prolongada historia agrícola y a su textura limosa (limos finos y muy finos), que le confieren una baja capacidad de regeneración de la estructura y porosidad luego de sufrir densificación o compactación. La siembra directa, actualmente, constituye el principal sistema de manejo en la región. La escasa o nula remoción del suelo en SD y el tráfico no controlado de maquinaria agrícola muy pesada, determinan procesos de compactación superficial y subsuperficial que pueden limitar la productividad de los cultivos (Alvarez C.R *et al.* 2008).

La escasa capacidad natural de regeneración de porosidad se agrava en suelos bajo uso agrícola debido al tránsito continuo y no controlado de implementos agrícolas y se mitiga con labores de remoción del suelo. Sin embargo, es también ampliamente conocido que el laboreo convencional conduce a la degradación de suelos agrícolas, la cual incluye pérdidas de espesor del suelo por erosión y reducción de los stocks de carbono y de nutrientes. La SD resulta una práctica adecuada para mitigar procesos erosivos asociados a la labranza en Molisoles. Sin embargo, combinada con la simplificación de las secuencias de cultivos y particularmente con el monocultivo de soja, genera la

necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de los suelos cultivados (Sasal *et al.* 2012).

La percepción sobre la existencia de compactación y/o endurecimiento en planteos de siembra directa por productores y técnicos ha llevado al intento de efectuar una disrupción mecánica de capas compactadas con implementos de labranza profunda (e.g. “para-till”; “paraplow”, “cultivie”). Los resultados son muy claros en lo que respecta a la resistencia del suelo, pero aún poco conocidos en lo que respecta a comportamiento de las raíces y rendimientos de los cultivos (Alvarez C.R *et al.* 2008).

Si bien los suelos bajo siembra directa tienden a presentar compactación, ésta no siempre es lo suficientemente importante como para limitar el rendimiento de los cultivos. El INTA desarrolló un modelo informático denominado Compacta TEST, el que a partir de parámetros físicos y biológicos del suelo, brinda una probabilidad y magnitud de la respuesta productiva esperada con una descompactación. De esta manera se obtiene información que orienta para descompactar los lotes más afectados y realizar un seguimiento de los lotes no comprometidos (Pozzolo e Iruiria, 2012). Este desarrollo del INTA se constituye en una herramienta cuya validación en diferentes condiciones ambientales resulta necesaria para evaluar su utilidad como apoyo a la toma de decisiones de manejo del suelo.

El presente trabajo aborda un estudio de descompactación edáfica en un sitio con historia de uso agrícola- ganadera, en donde resulta de interés evaluar el impacto de este manejo sobre indicadores físicos y biológicos del suelo, así como contribuir a la validación del modelo Compacta test para condiciones de suelo, uso y manejo, representativos de los sistemas de producción del sur de la provincia de Córdoba.

1.2 Antecedentes

La compactación edáfica es una problemática presente en gran parte de los suelos de baja producción. La calidad física de los suelos agrícolas y ganaderos de la provincia de Córdoba, presenta procesos de deterioro en los primeros 30 cm del suelo (Cisneros *et al.* 2015). Rollan *et al.* (2004) evaluaron la compactación subsuperficial de molisoles del norte de Córdoba, sometidos a siembra directa continua y observaron un efecto negativo sobre la densidad aparente y la retención de agua útil. Bonadeo *et al.* (2003) estudiaron el impacto de la densificación sobre el crecimiento de raíces de maní en Haplustoles típicos del centro sur de Córdoba y Cholaky *et al.* (2005) observaron

rasgos estructurales que indican procesos de densificación superficial y subsuperficial en los perfiles culturales de Haplustoles típicos en planteos continuos en siembra directa.

Los procesos de densificación en suelos con alto contenido de arcillas se magnifican bajo el uso continuado de sistemas de siembra directa. El deterioro del suelo, se expresa, tanto a través de un incremento en la densidad aparente y resistencia a la penetración, como también en una disminución de la capacidad de infiltración del agua y del intercambio gaseoso. De esta manera se vuelve necesario probar alternativas de tratamiento del suelo como la labranza en franjas o la labranza vertical para intentar mantener una adecuada condición edáfica (Paredes *et al.* 2009).

El crecimiento óptimo de los cultivos tiene lugar con niveles de compactación relativa (CR) entre 75 y 83 %, y es afectado negativamente con valores superiores a 90 % (Taboada y Micucci, 2002).

La combinación de la siembra directa con la utilización de escarificadores destruye capas densas a la vez que mantiene la cobertura del suelo produciendo una mejora en propiedades edáficas, y en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Bonel *et al.* 2002).

Numerosos estudios han demostrado que la siembra directa es una práctica que puede revertir o frenar el proceso de degradación de la fertilidad del suelo. Ésta práctica favorece la acumulación de materia orgánica en los primeros centímetros del perfil, como consecuencia de la concentración de la totalidad de los residuos provenientes de los rastrojos de los cultivos, lo cual mejora la estructura y la fertilidad química del suelo (Peirone *et al.* 2008). Sin embargo, son numerosos los trabajos que indican que planteos de siembra directa continuos producen compactación superficial, ya sea por la no remoción del suelo como por las elevadas presiones a las que está sujeta el mismo (Draghi *et al.* 2005; Raper, 2005; Alvarez C.R *et al.* 2008).

Cholaky *et al.* (2002), trabajaron en un Haplustol típico franco arenoso fino del oeste de General Deheza, partiendo de dos condiciones de compactación del perfil cultural: alta compactación (AC) con una capa homogéneamente densificada entre los 12 y los 28 cm de profundidad y baja compactación (BC), con una capa irregularmente compactada a igual profundidad que la anterior, que había recibido una labor con subsolador alado dos años atrás. En el perfil cultural se observó que tanto en AC como en BC, la labor de descompactación fragmentó marcadamente la capa densificada. En cuanto a la densidad aparente se observó reducción de la misma, así como en la resistencia mecánica (RM) del perfil descompactado en ambas situaciones de compactación.

Cacciavillani (2009), sobre un Haplustol típico franco arenoso de la zona de Alcira Gigena, Córdoba, evaluó la persistencia de la descompactación por el efecto del tránsito posterior a ella y observó que la RM de los tratamientos descompactados se redujo significativamente en los sectores bajo las huellas de la cosechadora, respecto a los que estuvieron fuera de ellas.

Por su parte Brusasca (2013), en un Hapludol típico franco arenoso de la llanura ondulada del sur de Córdoba, observó que en los seis meses de duración de su estudio, en los que no hubo tránsito de maquinarias, se produjo una disminución del grado de aflojamiento relativo producido por una labor de descompactación, especialmente en la capa superficial, atribuyéndolo a procesos de consolidación natural producido por precipitaciones, procesos de humedecimiento- secado, entre otros. Bergesio (2011) evaluó el efecto de una labor de descompactación con subsolador alado en un Haplustol típico del sur de Córdoba y observó una marcada reducción de la resistencia mecánica y un incremento en el rendimiento de maíz, respecto a una situación con siembra directa continua.

En un Argiudol típico del sudeste bonaerense, bajo diferentes usos, se evaluó la densidad aparente y la resistencia a la penetración, observando que en los usos asociados a mayor intensidad de laboreo y tráfico de maquinarias y del ganado vacuno, se produjo un incremento de la DA y la RM (Alvarez M.F *et al.* 2008).

Soracco *et al.* (2008), en un Argiudol típico de San Antonio de Areco estudiaron el efecto de la descompactación en un planteo de siembra directa con dos tratamientos: siembra directa con laboreo de descompactación (SDCD) y siembra directa sin laboreo de descompactación (T). A su vez se evaluaron dos subtratamientos; sobre la huella de la cosechadora sin descompactación (TT) y sobre la huella de la cosechadora que transitó sobre zonas descompactadas (SDCDT). Para el caso de SDCDT el pasaje de la cosechadora produjo una marcada disminución de la tasa de infiltración básica y también de la infiltración acumulada en el tiempo. En el T (siembra directa sin descompactación) no hubo diferencias estadísticamente significativas que evidencien una disminución de la tasa de infiltración con el pasaje de la maquinaria, respecto a la situación sin tránsito.

En un Argiudol típico franco arcillo limoso de la subregión Pampa Ondulada, la DA mostró importantes diferencias entre siembra directa (SD) y siembra directa descompactada mediante subsolado (SDS). Entre 20 y 40 cm, se expresa significativamente la menor DA del tratamiento SD y la semejanza entre el tratamiento SDS y md (mínima disturbación: monte que nunca se usó para hacienda). Las mayores diferencias en RM se manifestaron en la situación de siembra-emergencia,

coincidiendo con el menor contenido hídrico del suelo, los valores más bajos fueron para md y SDS, mientras que los más altos fueron para SD y LR (labranza reducida). En condiciones de elevada humedad en el suelo, como en postcosecha, las diferencias en RM se hacen menos evidentes en todo el perfil. En cuanto a la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada, los valores máximos se hallaron en SD y SDS, en cambio los valores más bajos se encontraron en LR y LRS (labranza reducida descompactada mediante subsolado) (Faita y Cisneros, 2008).

Según Díaz-Zorita (2000), en la campaña 1995-96 no se detectaron diferencias significativas en la productividad de los cultivos de girasol en un suelo Hapludol típico de la región subhúmeda pampeana. En la campaña 96-97, la presencia de una capa subsuperficial compacta redujo significativamente los rendimientos y la producción de aceite de los cultivos. Las diferencias entre ambas campañas se atribuye a la mejor provisión hídrica en el ciclo 1995-96 (412 mm) que en 1996-97 (290 mm). La reducción en la productividad de los cultivos en la campaña 1996-97 se relacionó negativa y significativamente con los niveles de resistencia a la penetración de las capas ubicadas por debajo de 25 cm de profundidad.

En un Argiudol típico en el partido de Carmen de Areco (Buenos Aires), se observó que los tratamientos ubicados en posición de media loma que fueron escarificados, presentaron una mayor infiltración inicial respecto al tratamiento sin escarificar, mientras que en el suelo escarificado de la posición de loma no hubo diferencias significativas respecto a la situación sin descompactar, indicando que el efecto del escarificado en la media loma, además de incrementar la acumulación de agua en el perfil, propiciaría una disminución de los escurrimientos y del riesgo de erosión hídrica. En cuanto a la densidad aparente no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos escarificados y testigos en ninguna de las profundidades que fueron analizadas (Faita *et al.* 2012).

Para un suelo similar, Elissondo *et al.* (2012) observaron que la densidad aparente presentó diferencias significativas entre labranza reducida (LR) y siembra directa (SD). Los mayores valores de densidad aparente correspondieron a la SD (siembra directa). El valor de DA superficial (3-8 cm), muestra una tendencia a estabilizarse alrededor de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ luego de cuatro años de SD.

Guecaimburu *et al.* (2012), observaron que en un Argiudol típico de la pampa ondulada, con horizonte A arcillo limoso y estructura en bloques sub-angulares medios, fuertes, la infiltración fue significativamente mayor y la resistencia mecánica significativamente inferior en siembra directa

con subsolador paratill respecto de la siembra directa continua, mientras que la DA no mostró ser un parámetro sensible para determinar el efecto descompactador de la herramienta aplicada.

Sasal *et al.* (2012), observaron la presencia de estructura laminar en el 100% de los lotes de la pampa húmeda centro-norte con distinta antigüedad de siembra directa. La proporción de estructura laminar en el perfil está asociada con el número de años bajo siembra directa y con el índice ISI (Índice de identificación de la secuencia), que integra características de los sistema de cultivos difíciles de cuantificar, como la duración de los barbechos, los momentos de siembra y cosecha, y la continuidad de la actividad biológica asociada a las raíces activas en el suelo.

Sobre un Argiudol típico de la serie O'Higgins, Alvarez *et al.* (2012 a), encontraron que la presencia de estructura laminar en lotes bajo SD aumentó mayoritariamente hacia la posición de la cabecera del lote, debido al mayor tránsito de maquinarias; en contraposición con esto la estructura granular disminuyó con la cercanía a la cabecera. También observaron que si el cultivo antecesor es trigo/soja de II, la frecuencia de estructura granular en el lote es mayor y en consecuencia la presencia de estructura laminar es menor.

En dos suelos de la región pampeana, ubicados cerca de la localidad de Lobos y cerca de la localidad de Norberto de la Riestra, se observaron diferencias en la estructura de los mismos. Los lotes estudiados tenían una historia de más de diez años de siembra directa y con la misma secuencia de cultivos de tres años (maíz- soja-trigo/soja), antes habían estado bajo labranza convencional por más de 20 años. El suelo del primer sitio fue un Argiudol típico con un horizonte superficial A franco (48% limo, 20% arcilla), el mismo reveló la presencia de una estructura laminar fuerte en los primeros 10 cm; en cambio el suelo del segundo sitio fue un Hapludol éntico con un horizonte superficial A franco arenoso (20% limo, 10% arcilla), éste presentó una estructura granular en los primeros 2 cm y bloques moderados medios a partir de esa profundidad (Lozano *et al.* 2012).

Domínguez *et al.* (2008), observaron, en la cuenca General Deheza, Córdoba, ciertas diferencias entre la macro fauna edáfica presente en pastizales naturales y en Haplustoles típicos con más de 15 años de siembra directa continua. La densidad media de lombrices (*Lumbricina* sp), hormigas (*Formicidae* sp) y macro fauna total fue significativamente superior para los pastizales naturales con respecto a la siembra directa. Estos autores encontraron correlaciones positivas entre el contenido de materia orgánica del horizonte superficial y la abundancia de lombrices, hormigas, larvas y coleópteros; así como también correlaciones de signo negativo entre la densidad aparente del horizonte superficial y la abundancia de *Lumbricina* y *Formicidae*. Los taxa *Coleoptera* y *Araneae* mostraron una abundancia significativamente menor en los sitios con siembra directa.

1.3 Hipótesis

- En un Haplustol típico con presencia de capa compactada, la inclusión de una labor de descompactación subsuperficial, incrementa el rendimiento de un cultivo de maíz debido a su efecto positivo sobre variables físicas y biológicas del suelo.

1.4 Objetivos

Objetivo General:

- Evaluar indicadores físicos y biológicos en un Haplustol típico en dos condiciones de suelo: compactado y descompactado y su impacto sobre el rendimiento del cultivo.

Objetivos Específicos:

- Evaluar el perfil cultural de dos condiciones de suelo: compactado y descompactado.
- En ambas situaciones, cuantificar velocidad de infiltración, compactación relativa, resistencia mecánica y número de lombrices/m².
- Medir el rendimiento de un cultivo de maíz implantado en esas dos situaciones de suelo.
- Estimar la intensidad de tránsito agrícola correspondiente al manejo de siembra directa.
- Evaluar la utilidad del modelo Compacta Face II para la recomendación de la descompactación del suelo.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de trabajo

La experiencia se realizó en un establecimiento agropecuario ubicado 5 km al oeste de la localidad de Bulnes ($33^{\circ}30'51,56''$ S; $64^{\circ}40'35,48''$ O), tal como se observa en la figura 1. El relieve donde se encuentra el área experimental es normal-subnormal, formado por planicies muy suavemente onduladas. Esta zona, perteneciente a la unidad catastral (Bulnes), presenta pendientes largas en el sector norte de la unidad y muy largas en el resto, con gradientes generales de 0,7 a 1% en el norte y 0,3 a 0,5% en el sur. Las tierras tienen aptitud agrícola, aunque presentan limitaciones de tipo climática y elevada susceptibilidad a la formación de capas densas superficiales y subsuperficiales, problemas de micro y meso-relieve de origen natural y/o antrópico, que originan sectores de inundación temporaria y posterior manchoneo de cultivos (Cantero *et al.* 1986).

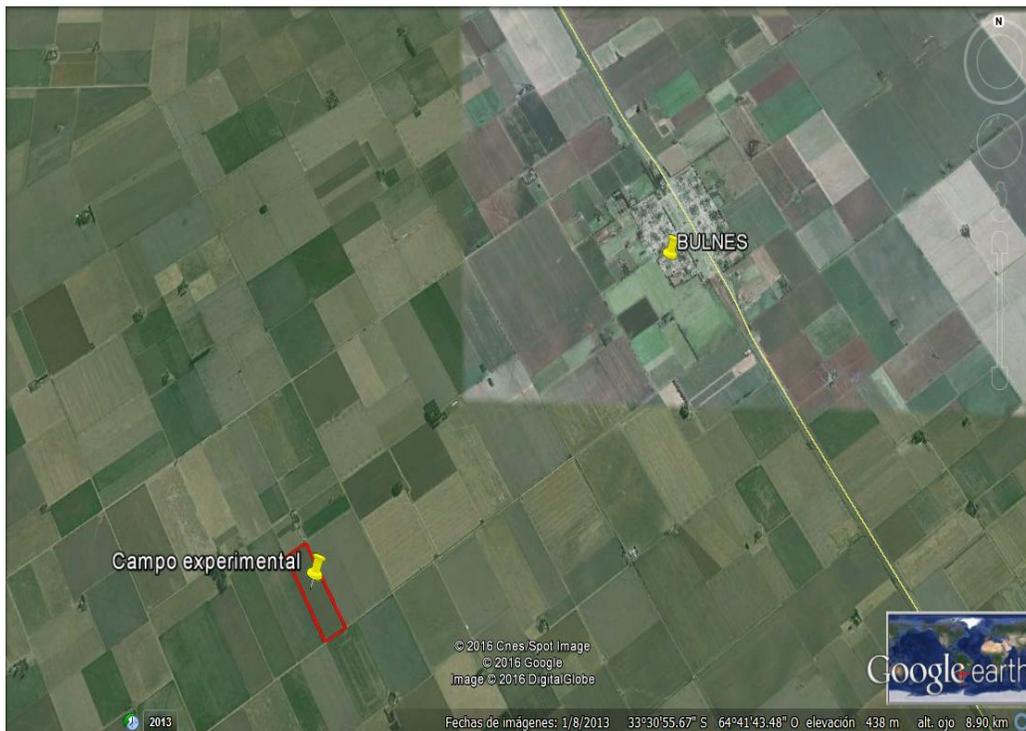


Figura 1: Ubicación del sitio experimental.

El suelo es un Haplustol típico de textura franca arenosa muy fina perteneciente a la Unidad Cartográfica MNud-5 del Atlas Los Suelos (Agencia Córdoba Ambiente- INTA, 2006), correspondiendo a la serie Italó por presentar la mayor similitud morfológica y analítica. El mismo es bien drenado a algo excesivamente drenado, presenta una retención de humedad moderada y

estructura superficial moderada. Las características morfológicas y analíticas se describen en el anexo 1.

El clima es templado sub-húmedo, con un régimen de precipitaciones monzónico, ya que el grueso de las precipitaciones se concentra en los meses más calurosos del año (Diciembre, Enero y Febrero). La precipitación media del periodo 1974/1993 fue aproximadamente de 801,2mm. En cuanto a las heladas, la fecha extrema de primeras heladas es el 29 de abril, la fecha media de primeras heladas corresponde al 25 de mayo con una desviación típica de +/- 44,3 días. La fecha extrema de últimas heladas es el 4 de noviembre, la fecha media de últimas heladas es el 12 de septiembre con una desviación típica de +/- 20,3 días. El período medio con heladas corresponde aproximadamente a 109,3 días, y el período medio libre de heladas corresponde a 255,7 días. La temperatura media anual es de 16,5 °C, siendo el mes de enero el más caluroso con una media de 23,6 °C y el mes más frío julio con una media de 9,4 °C (Seiler *et al.* 1995).

2.2 Tratamientos y diseño experimental

El ensayo a campo se realizó en un lote que provenía de una pastura de alfalfa degradada de 5 años de duración, en el que mediante una evaluación cualitativa de la condición estructural del perfil se diagnosticó la presencia de una capa densificada. Se efectuó la siembra de un cultivo de maíz con dos sistemas de labranza: Siembra Directa (**SD**) y siembra directa + descompactación con un subsolador alado (**SDD**).

El tratamiento **SDD** consistió en realizar una labor de descompactación subsuperficial con un subsolador de 6 rejas aladas, rígidas, con ancho de trabajo de 10 cm. Dichas rejas son fabricadas por la empresa INGERSOLL, (código IAR-0642-C), constan de timones rectos con regulación para ángulo de ataque, filos longitudinales y verticales, elaborados con acero boro, tratados y cementados con un espesor de 9,52 mm, y montados sobre el bastidor de un arado de cinceles PAMPERO (1998). La capacidad de trabajo es hasta 0,35 m de profundidad con un distanciamiento de 40 cm. Para realizar ésta operación se utilizó un tractor ZANELLO 460C de 160 HP (120 kW).

Al subsolador se enganchó un rolo con el fin de ir rompiendo los terrones que van quedando sobre la superficie e ir emparejando el terreno para dejar lista una adecuada cama de siembra.

La labor de descompactación se realizó el día 28 de octubre de 2013 a una velocidad de 5, 1 km/h, llegando a una profundidad de 29 cm aproximadamente y en condición de suelo friable, estado óptimo para realizar este tipo de labor.

Los dos tratamientos fueron sembrados con maíz (*Zea mays* L.), con el híbrido SYN 960 TDTG (Syngenta) el 5 de diciembre de 2013 usando una densidad de 65000 pl/ha, con una sembradora

CELE Plus 7000 (2007), de tipo siembra directa con equipo de doble fertilización. La misma consta de 14 surcos espaciados a 52,5 cm (ancho de trabajo 7,35 m). La fertilización se realizó en el momento de la siembra aplicándose 33,6 kg/ha de nitrógeno, 12 kg/ha de fósforo con nitrocomplex. El tractor que se utilizó en la siembra fue un JOHN DEERE 6615 de 119 HP (88,5 kW).

La cosecha del cultivo se realizó con una cosechadora John Deere 9600 maximizer, dotada de ruedas duales delanteras radiales.

Las parcelas en el sitio experimental tuvieron una longitud de 30 m y un ancho de 20 m cada una, en total se utilizaron 8 parcelas.

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con cuatro repeticiones por cada tratamiento (**SDD Y SD**).

2.3 Evaluaciones

En los dos tratamientos (**SDD Y SD**) se midieron las siguientes variables:

Del suelo:

√ **Perfil cultural:** Inmediatamente después de la siembra se realizó una evaluación del perfil cultural para evaluar el estado de la estructura en el espesor afectado por la labranza. La evaluación se efectuó mediante el método propuesto por Gastronneau y Manichon (1987), el cual consiste en realizar una excavación en forma transversal a la dirección de la labranza de aproximadamente 0,40 m de profundidad por 1,20 m de ancho y sobre una de sus paredes previamente alisada, se procede a distinguir, con la ayuda de algún elemento punzante, diferentes zonas de estructura tanto en el sentido vertical como lateral del perfil. Se realizó una medición por tratamiento y repetición.

En el estadio próximo al inicio del período reproductivo del maíz se evaluaron las siguientes variables:

√ **Densidad aparente actual (DA):** Esta medición se efectuó a campo mediante el método del cilindro (Klute, 1986), comprendiendo el espesor de suelo afectado por la labor, a intervalos de 10 cm. Se realizaron 3 mediciones por tratamiento y repetición.

√ Compactación relativa (CR): Mediante la extracción de una muestra compuesta, de similares espesores de suelo que en la variable anterior, por tratamiento y repetición, en laboratorio se determinó la compactación máxima (DA-máx.), mediante el ensayo de Proctor (Klute, 1986). A partir de esta variable y la DA obtenida a campo (DA), se estimó la CR (Carter (1990)) mediante la siguiente relación:

$$(Da \text{ actual} / DA \text{ máx.}) \cdot 100 = CR (\%)$$

Una vez realizado el ensayo de Proctor para determinar la DAP máxima del suelo, se realizó un análisis de la curva de DA vs Humedad y se estimó la **Susceptibilidad a la compactación del suelo**, mediante el cálculo de la pendiente de la recta ascendente de la curva, según el método de Mettauer *et al.* (1983). Esta estimación se realizó con el objetivo de obtener un valor que sirva como un indicador útil de la susceptibilidad a la compactación que presenta el suelo. La susceptibilidad a la compactación se obtuvo de la siguiente relación:

$$(\Delta DA / \Delta W),$$

Donde:

ΔDA : DA máx.- DA min ($Mg \text{ m}^{-3}$) y

ΔW : contenido de agua a la que se produce la DAP máx. (W_m) – contenido de agua al inicio de la curva de sensibilidad (W_i).

√ Resistencia mecánica (RM): Se midió a través del penetrómetro de impacto (INTA Villegas, 2010) graduado cada 5 cm, con ángulo de cono de 30° , correspondiendo cada golpe a $2,75 \text{ kg/cm}^2$. En cada tratamiento y repetición, sobre una transecta de 2 m de largo cortando la dirección de siembra, se realizaron 5 determinaciones distanciadas 40 cm hasta 30 cm de profundidad con lecturas cada 5 cm. Este procedimiento se repitió 2 veces en cada tratamiento y repetición. La RM se estimó mediante la siguiente relación:

$$RM (MPa) \approx \frac{2,75kg / cm^2 \times N^{\circ} impactos}{10}$$

De manera simultánea a esta medición se extrajo una muestra compuesta de suelo de cada tratamiento y repetición, a intervalos de 10 cm hasta los 40 cm de profundidad, para la determinación de la humedad gravimétrica mediante secado en estufa a 105° C.

- √ Velocidad de infiltración: Se midió con el método del permeámetro de disco Perroux y White. (1988), que consiste en un disco de 12,5 cm de diámetro, cubierto en su base por una fina membrana de nylon con poros de 20 μ de diámetro. El tubo sirve de Mariotte y posee una entrada móvil de aire que se usa para ajustar el potencial agua en la base de la malla de nylon. Este tubo de depósito de agua para la infiltración lleva una escala graduada que permite leer los volúmenes de agua infiltrada en función del tiempo. En el lugar donde se realizaron las mediciones se procedió a retirar la vegetación presente para lograr una superficie uniforme y nivelada. Se colocó un anillo metálico para mejorar el contacto entre la base del disco y el suelo, el cual fue relleno con arena fina y se enrasó con una regla con el objetivo de que quedara firme. Para la evaluación se aplicó una cierta lámina de agua y las primeras tres mediciones se tomaron cada cinco minutos y las siguientes cada diez minutos completando un tiempo total de medición de ciento diez minutos en promedio, hasta alcanzar un valor constante. Una vez finalizada la medición se realizó una calicata con el objetivo de determinar la profundidad de mojado y el diámetro de mojado en el suelo. Se realizaron 2 mediciones en cada tratamiento y repetición.

- √ Número de lombrices: Se evaluó según la metodología propuesta por Pozzolo e Irurtia, (2012), a partir del recuento del número de individuos (insectos, artrópodos y lombrices) presentes en un metro cuadrado de superficie y a una profundidad de 0 a 30 cm. Para ello se remueve el suelo con una palita, desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad en un área de 0,25 m² (50 cm x 50 cm), se cuenta el número de individuos observados a simple vista y se multiplica por 4 para llevar el número de insectos obtenidos a m². Se realizaron 3 mediciones en cada tratamiento y repetición.

Del cultivo:

- √ Rendimiento final de granos: Se estimó la producción de granos del cultivo de maíz a través de la cosecha manual de cada una de las parcelas, la misma se realizó tomando cuatro muestras por parcela, se eligieron dos surcos y se marcaron tres metros lineales recolectando todas las espigas presentes y finalmente se desgranaron con una maquina trilladora estática pesando la muestra. Se midió la humedad de las espigas y luego se fueron ajustando los rendimientos a un 13 % de humedad, que se considera la humedad óptima de cosecha del cultivo de maíz.

Del manejo del suelo y del cultivo:

- √ Intensidad del tránsito agrícola (ITA): Este parámetro expresa el tránsito de la maquinaria sobre el terreno en función del peso transportado por kilómetros recorridos en una hectárea trabajada, se mide en toneladas por kilómetro recorrido por hectárea ($t.km.ha^{-1}$) ó en ($Mg.km.ha^{-1}$) (Pozzolo e Irurtia, 2012).

Para el cálculo del ITA se utilizaron los datos dados por el fabricante de la maquinaria (peso total promedio, ancho de labor y número de pasadas por Ha), correspondiente al sector sin labor de descompactación. Se calculó el valor del ITA para cada uno de los implementos (sembradora-tractor-cosechadora) utilizados durante el año agrícola y luego fueron sumados para obtener el Índice de Tránsito Agrícola Total (**ITAt**). Si se trata de una rotación de varios años se suma el ITA de cada uno de los implementos utilizados en la rotación y se obtiene el valor total que se anualiza. En este caso, el lote donde se realizó el ensayo, provenía de cinco años de una pastura de alfalfa, por lo que se consideró que las secuencias de labores mencionadas precedentemente es la que se habría aplicado en cada año de dicho período. Para calcular el ITA de cada una de las maquinarias de peso y ancho de labor conocido se aplicó la siguiente expresión:

$$\text{Índice de Transito Agrícola (ITAt)} = \frac{\text{Peso Maquinaria (t)} \times 10}{\text{Ancho labor (m)}} = \frac{\text{Mg} \cdot \text{Km}}{\text{ha}}$$

ITAt: Σ del ITA de cada uno de los implementos utilizados en el año agrícola.

√ Evaluación de la utilidad del modelo COMPACTA FACE II (Pozzolo e Irurtia, 2012). Este modelo brinda información sobre la necesidad o no de realizar una labor de descompactación del suelo. Se realizaron corridas del modelo, ingresando los valores de las variables evaluadas en la condición de SD. El modelo arroja un resultado numérico correspondiente a la escala de compactación del suelo, que oscila entre < 40 a > 90, muestra además, la respuesta productiva esperable y una recomendación de descompactación mecánica, según se indica en la tabla 1. Se establecen, mediante algoritmos, relaciones entre los parámetros y el grado de afectación del suelo, de modo que a mayor valor numérico de la escala de compactación mayor es el efecto de la compactación y mayor es la afectación del rendimiento. Las salidas obtenidas se cotejaron con los resultados observados en SDD.

Tabla 1: Escala de compactación y recomendación de descompactación mecánica del modelo COMPACTA FACE II. (Pozzolo e Irurtia, 2012).

Escala propuesta de compactación.	Incremento del rendimiento esperado (%).	Recomendación de descompactación mecánica.
< 40- 50	Ninguno.	No es recomendable descompactar (NO).
50-60	5	Efecto neutro a leve, se sugiere la rotación de cultivos (N).
60-70	5-10	Es recomendable descompactar, respuesta productiva leve (R1).
70-80	10-20	Es recomendable descompactar, respuesta productiva moderada (R2).
80-90	20-25	Es recomendable descompactar, respuesta productiva importante (R3).
>90	>25	Es recomendable descompactar, respuesta productiva muy importante (R4).

√ Para la utilización del modelo se tuvieron en cuenta variables del suelo como textura, humedad al momento de medir resistencia mecánica, compactación relativa y estructura superficial, además se utilizaron datos de infiltración, resistencia mecánica, huellado del terreno y presencia de lombrices e insectos. En cuanto al tránsito de la maquinaria agrícola el modelo propone realizar el cálculo del ITA (índice de tránsito agrícola). Para realizar este cálculo se tuvieron en cuenta todas las maquinarias que fueron utilizadas en el tratamiento SD y se construyó una tabla con los siguientes datos: maquinaria utilizada, número de pasadas, ancho de la labor en metros, peso cargado y descargado en toneladas. Respecto a la rotación de cultivos realizada, debido a que el lote provenía de una pastura de alfalfa de cinco años de duración y que el modelo no contempla rotaciones con pasturas, se realizaron las simulaciones considerando tres rotaciones posibles: **a) Monocultivo, soja o similar:** Soja-Soja-Soja- Maíz, **b) Rotación agrícola ganadera, cultivos y pasturas:** Soja- Trigo- Maíz- Trigo y **c) Rotación agrícola con participación importante de trigo, maíz y/o sorgo:** Maíz- Maíz- Maíz- Soja.

2.4 Análisis estadístico de los resultados

Los datos obtenidos de las distintas evaluaciones fueron analizados mediante el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.* 2011). Para cada variable analizada se realizaron los anovas correspondientes con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y el test de comparación de medias se hizo mediante la prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC), con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ para todas las variables. El análisis de los valores de RM y DA se realizó según capas de perfil cultural: 0- 10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30- 40 cm y 0-13 cm, 13- 26 cm para RM y DA, respectivamente.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del perfil cultural en los dos sistemas de labranza analizados

El perfil cultural correspondiente al tratamiento **SDD** mostró cambios en la estructura del suelo respecto a **SD**. Hasta los 28 cm aproximadamente, los terrones fueron medianos a pequeños, fácilmente discernibles. Hasta los 18 cm de profundidad el perfil presentó bloques pequeños, de aquí hasta los 25 cm, bloques angulares moderados a débiles y a partir de 25 - 30 cm, bloques grandes, angulares, moderados. Se observó que la profundidad efectiva de la labor en los sectores donde pasaron las rejas de la herramienta fue de 29 cm y en los sectores entre rejas la profundidad fue de 27 cm (Figura 2).



Figura 2: Profundidad efectiva alcanzada por la labor en el tratamiento **SDD**.

La situación **SD** presentó terrones grandes y bloques angulares fuertes en los primeros 15 cm, de allí se fueron rompiendo de bloques angulares fuertes a bloques moderados hasta 25- 30 cm. A partir de esa profundidad el perfil cultural mostró bloques angulares moderados. En la situación de **SD**, especialmente en el primer espesor se encontraron terrones de mayor tamaño que en la situación de **SDD**, situación en la que los terrones encontrados en similar espesor, fueron de un tamaño mediano a pequeño (Figura 3).



Figura 3: Perfil del tratamiento bajo **SD**.

Ésta evaluación cualitativa del perfil cultural correspondiente a ambos tratamientos indicó que ambos perfiles presentaban condiciones físicas diferentes. El perfil de **SDD** aparecía fragmentado, con unidades fácilmente discernibles (figura 2), mientras que en el de **SD** la estructura mostraba una apariencia continua, con escasas fisuras y agregados escasamente discernibles (Figura 3).

Similares resultados fueron hallados por Cholaky *et al.* (2005), quienes en un Haplustol típico franco arenoso evaluaron y compararon el efecto de una labor con un subsolador alado en dos situaciones de compactación: alta (AC) y baja (BC). La situación de BC se atribuyó al efecto acumulado de cuatro años de aflojamiento con subsolador alado reja cero y luego dos años sin recibir ningún tipo de intervención; y AC correspondió a una situación con el mismo periodo de años que la anterior pero bajo siembra directa continua. Antes de realizar la labor de descompactación, en el perfil de BC el espesor de la capa densificada denominada “piso de arado” (H8) fue desuniforme debido a que apareció entrecortado por sectores H7 (sector donde perduraba el efecto de la labor de descompactación de años anteriores) de menor cohesión, en cambio en el perfil de AC, H8 se presentó uniformemente compactada desde los 12 hasta los 30 cm de profundidad. Después de realizada la labor de descompactación, los perfiles de BC y AC variaron notablemente. En ambos se diferenciaron dos capas desde la superficie hasta la profundidad de trabajo de la herramienta: H1 y H5. La capa superficial H1 presentó mayor desagregación que el

resto del perfil, en cambio el horizonte subsuperficial H5 se dividió en H5 propiamente dicho y H5' para indicar los sectores en donde paso la reja del implemento y los sectores que quedaron entre rejas, respectivamente.

En concordancia con lo citado anteriormente, sobre un Haplustol típico franco arenoso cercano a la localidad de Bulnes, Bergesio. (2011) también observó que luego de realizada la labor de descompactación se produjo la diferenciación de dos capas en el perfil: H5 y H8. La primera capa correspondió a los sectores fisurados por la labor, mientras que la segunda a aquellos sectores de la capa compactada que no fueron alcanzados por la labor.

Rodríguez *et al.* (2014) trabajaron sobre un Argiacuol vértico bajo distintos manejos de suelo: SD, LC y una situación testigo de Monte, la cual no presentaba ningún tipo de intervención antrópica. Estudiaron lo que sucedía con la estabilidad de los agregados del suelo en los distintos tratamientos, concluyeron que la situación testigo (Monte) fué la que presentó los agregados más estables (> 2mm), SD se encontró en una situación intermedia presentando agregados inestables (0,5- 1mm) y por último LC fue el tratamiento en el que se encontraron agregados pequeños y muy inestables (0,2- 0,5 mm).

3.2 Evaluación de variables físicas y biológicas

3.2.1 Resistencia Mecánica

Al analizar la resistencia mecánica del suelo se observó que la misma fue distinta para ambos sistemas de labranza en las dos primeras profundidades (0- 10 cm y 10-20 cm), no presentando diferencias significativas en las profundidades siguientes (20-30cm y 30-40cm). Sin embargo, la **RM** del perfil de **SDD** mostró valores inferiores a **SD** en todo el espesor analizado, situación esta última en la que los valores de **RM** superaron ampliamente el valor umbral de 2 Mpa, a partir del cual comienza a verse restringido el crecimiento radicular (Raper, 2005) (Tabla 2).

Tabla 2: Distribución de la resistencia mecánica del suelo de acuerdo a la profundidad y el sistema de labranza utilizado.

Espesor (cm).	Resistencia mecánica (MPa)		p-valor
	SDD	SD	
0-10	1,08 a	1,97 b	0,0015
10-20	1,80 a	3,54 b	0,0369
20-30	2,10 a	4,48 a	0,1776
30-40	2,40 a	3,05 a	0,5392

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre tratamientos (nivel de significancia: $\alpha = 0,05$).

Respecto al valor umbral de RM, Boone *et al.* (1986) encontraron valores críticos de RM que pueden afectar el rendimiento del cultivo de maíz, que varían desde 1,5 MPa como límite crítico inferior, a partir del cual el crecimiento radicular se reduce en un 50 %, y 3 MPa como límite crítico superior, a partir del cual cesa el crecimiento radicular. Los resultados de este trabajo muestran claramente que en el tratamiento de SD la RM superó al valor citado como límite crítico inferior en todas las profundidades analizadas y resultó marcadamente superior al límite crítico superior a partir de los 10 cm de profundidad, resultando un 16% y 49 % superior de 10-20 cm y 20- 30 cm, respectivamente y similar a dicho valor en el espesor de 30-40 cm, mientras que en SDD la RM resultó levemente superior al nivel crítico inferior entre los 10- 20 cm, para luego incrementarse en un 40% y 60% respecto al mismo nivel crítico, en los espesores de 20-30 cm y 30-40 cm, respectivamente. En ningún espesor la RM de SDD alcanzó el nivel crítico superior de 3 MPa.

La humedad gravimétrica (**HG**) en el perfil bajo siembra directa fue superior en todos los espesores analizados que la del perfil con labor de descompactación (Gráfico 1), por lo que la menor **RM** en el tratamiento de **SDD** en comparación a la de **SD** puede atribuirse al efecto de aflojamiento producido por la labor de descompactación subsuperficial, ya que existe una estrecha relación inversa entre **RM** y contenido de agua del suelo.

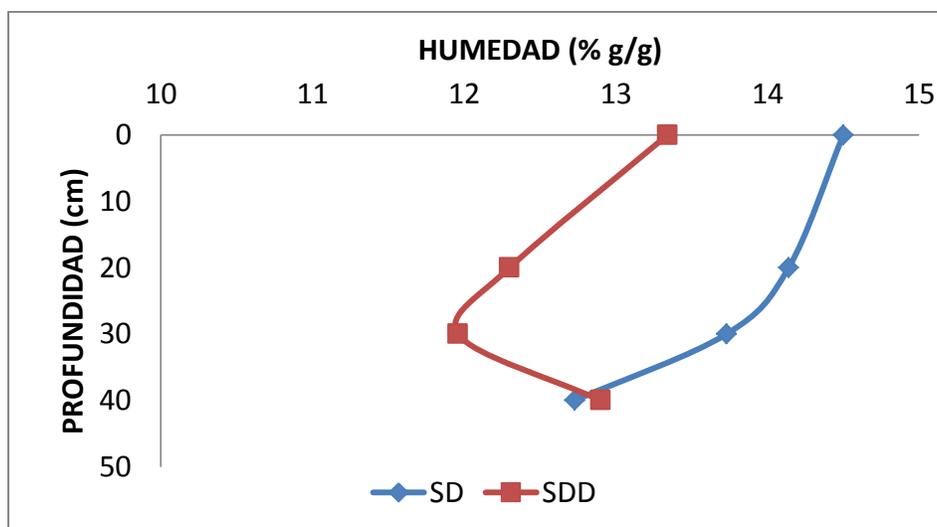


Gráfico 1: Perfil de distribución de agua en el suelo para los tratamientos de **SD** y **SDD** cercano al periodo reproductivo del maíz.

Los resultados del presente trabajo concuerdan con lo observado por Guecaimburu *et al.* (2012) en un Argiudol típico franco arcilloso en la localidad de Azcuénaga, donde el efecto de la labor de descompactación sobre la resistencia mecánica fue importante, pero encontraron que se hizo significativo recién al segundo año de haber aplicado el paratill debido a las condiciones de humedad en el primer año de medición.

Las diferencias encontradas entre los tratamientos en los primeros 20 centímetros del perfil pueden atribuirse al efecto de la labor de descompactación, coincidiendo con lo encontrado por Reposo y Bonvecchi, (2012); los cuales observaron que sobre un Argiudol típico sometido a diez años de siembra directa continua recién a los ocho meses de realizado el subsolado se encontraron diferencias significativas solo en dos de las profundidades analizadas, de 10 a 15 y de 15 a 20 cm, posiblemente asociado a las condiciones hídricas de los perfiles. Sin embargo, estos resultados coinciden parcialmente con lo que hallaron Debelis *et al.* (2014) sobre un Argiacuol vértico en el partido de Ezeiza, Buenos Aires, quienes observaron que en las profundidades de 0- 5 cm y de 5- 10 cm hubo diferencias significativas entre SD y labranza convencional (LC), mientras que en la profundidad de 10- 20 cm no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

El efecto observado sobre este indicador de la condición física del suelo, resulta coincidente con los hallados por Bergesio (2011), Cacciavillani (2009) y Cholaky (2003), quienes observaron reducciones marcadas de la RM por efecto de la descompactación en planteos de larga historia con SD, en Haplustoles típicos, similares al suelo del presente trabajo.

Por su parte, Echeverría *et al.* (2008) no encontraron diferencias estadísticas significativas entre SD y SD con descompactación en los dos momentos de muestreo, inicio y final del cultivo de trigo; sin embargo concluyeron que en el inicio del ciclo a partir de los 5 cm y hasta los 15 cm de suelo SD fue el tratamiento que presentó los mayores valores de resistencia mecánica.

3.2.2 Densidad aparente actual del suelo

La densidad aparente del suelo mostró diferencias significativas en la primera profundidad analizada (0-13 cm), sin embargo no se encontró diferencia alguna entre ambos tratamientos en la profundidad 2 (13-26 cm) (Tabla 3).

Tabla 3: Distribución de la densidad aparente del suelo de acuerdo a la profundidad y el sistema de labranza utilizado.

Espesor (cm)	Densidad aparente (g/ cm ³)		p- valor
	SDD	SD	
0-13	1,30 a	1,39 b	0,0148
13-26	1,34 a	1,42 a	0,1086

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre tratamientos (nivel de significancia: $\alpha=0,05$).

La densidad aparente fue mayor en el tratamiento de **SD** en las dos profundidades analizadas, resultando ser un indicador menos sensible que la **RM** a los cambios producidos por la labor de descompactación.

Como se mencionó anteriormente, solo se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en la profundidad comprendida entre 0 y 13 cm, lo cual no coincide con lo observado por Reposo y Bonvecchi (2012) en un Argiudol típico franco limoso de la provincia de Buenos Aires. Ellos encontraron los mayores valores de DAP entre los 5 y los 25 cm de profundidad en el muestreo previo a la labor de descompactación y en los muestreos posteriores al subsolado los valores de DAP no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos para ninguna de las profundidades estudiadas.

Sanzano *et al.* (2008) también hallaron diferencias significativas en la densidad aparente superficial entre los distintos tratamientos analizados. Observaron una clara disminución en la DAP hasta los 20 cm de profundidad cuando se utilizó el paratill, después de esa profundidad no se hallaron diferencias significativas, y Cholaky (2003) observó una reducción significativa en la DAP inmediatamente después de realizada la labor de descompactación, respecto a la situación testigo SD.

Similares resultados fueron encontrados por Echeverría *et al.* (2008), los cuales al inicio del ciclo del cultivo de trigo y luego de un mes y medio de haber realizado la labor de descompactación, observaron diferencias significativas entre los tratamientos pero solamente entre los 6 y los 12 cm. El tratamiento RD-SD (Rastra de discos sobre siembra directa) fue el que mostró los menores valores de densidad aparente. Al final del ciclo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para las distintas profundidades, sin embargo los tratamientos RD- SD y PT-SD (Paratill sobre siembra directa) presentaron menores valores en los primeros centímetros del suelo, demostrando así una mayor duración del efecto de la labranza.

3.2.3 Densidad aparente máxima del suelo y humedad óptima

La densidad aparente máxima del suelo (Haplustol típico) fue de $1,62\text{g/cm}^3$ hasta los 13 cm, de allí a los 26 cm de suelo la DAP máxima fue de $1,65\text{g/cm}^3$. Para ambas profundidades la humedad óptima de compactación fue de 17% ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Estos resultados pueden apreciarse en el siguiente gráfico:

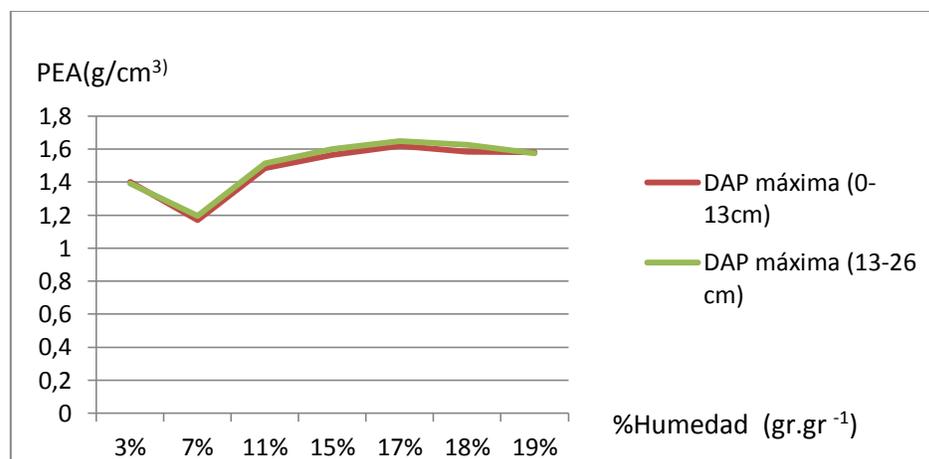


Gráfico 2: Curvas del **PEA** y contenido hídrico del suelo para las dos profundidades analizadas.

Parra *et al.* (2008) evaluaron la compactación de Haplustoles del área de General Deheza y encontraron valores similares al presente trabajo. Analizaron lo ocurrido en una situación natural (Sin intervención antrópica) y sobre una situación de siembra directa bajo distintos manejos. La densidad aparente máxima fue menor en la situación de mínima alteración (Nat) en los dos horizontes analizados (Ap y Bw), en cambio en los tratamientos agrícolas la DAP máxima fue mayor, incrementándose aún más en el horizonte de mayor profundidad (Bw).

Príncipe (2011), sobre un Hapludol típico ubicado en las cercanías del paraje La Aguada, analizó lo que ocurría con la compactación máxima del suelo bajo diferentes manejos. Observó que en el tratamiento SD, en la primera profundidad analizada, la DAP_{max} (Densidad aparente máxima) descendió durante el periodo 2002-2009, en cambio la $HDAP_{max}$ (Humedad a la que se alcanza la densidad aparente máxima) aumentó un 3% en ese mismo período. Para la situación no disturbada (ND), encontró que la DAP_{max} , para la primera profundidad analizada, fue de $1,20 \text{ g/cm}^3$, siendo el valor más bajo; sin embargo la $HDAP_{max}$ fue de 34,87%, la cual terminó siendo el valor más alto.

3.2.4 Susceptibilidad a la compactación del suelo

Al calcular la susceptibilidad a la compactación del suelo, se observó que el mismo presenta una susceptibilidad muy alta a compactarse, los resultados pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Tabla 4: Susceptibilidad a la compactación del suelo bajo estudio en las dos profundidades analizadas.

Profundidad (cm)	Wi (kg. kg ⁻¹)	Wm (kg. kg ⁻¹)	DAP máx. (Mg. m ⁻³)	Δ DAP	Susceptibilidad a la compactación.
0-13	0,07	0,17	1,62	0,45	4,5
13-26	0,07	0,17	1,65	0,455	4,55

Siendo:

Wi: Contenido de agua al inicio de la curva de sensibilidad,

Wm: Contenido de agua al que se produce la DAP máx. y

Δ DAP: DA máx. – DA min.

García Pita. (1985) solamente usa la diferencia entre la densidad aparente correspondiente a la parte ascendente de la curva de Proctor (Δ DAP).

Numerosos autores atribuyen que los suelos pueden presentar una mayor o menor susceptibilidad a la compactación de acuerdo al contenido de materia orgánica, textura, porosidad, entre otros.

González Cueto *et al.* (2009) analizaron los diferentes factores que provocan la compactación del suelo agrícola. Concluyeron que los factores de mayor incidencia son los de origen antrópico, siendo el tránsito de maquinarias agrícolas el más importante, éste se ve influenciado por la presión sobre el suelo, el peso de los sistemas de rodaje, el número de pasadas, la velocidad de desplazamiento, el patinaje, las condiciones de humedad para realizar las labores, entre otros. Observaron también que existen factores naturales que pueden influir sobre la compresibilidad y compactabilidad del suelo, tales como la textura, estructura, contenido de materia orgánica y contenido de humedad del mismo.

Willians y Reyes. (2010) estudiaron cuatro series de suelo de Venezuela y evaluaron la susceptibilidad a la compactación que presentaban los mismos. Ellos encontraron también que las variables edáficas que mayor efecto tuvieron sobre el comportamiento de la curva de compactación, de las variables humedad crítica de compactación y densidad aparente máxima fueron el contenido de materia orgánica, limo y arena. Concluyeron que los suelos que presentaron un mayor predominio de partículas de limo estarían más predispuestos a una compactación superficial y a mayores riesgos de compactación, en cambio los suelos que presentaron un abundante contenido de materia orgánica el riesgo a compactarse sería menor ya que la misma tiene un efecto favorable sobre las propiedades físicas del suelo.

3.2.5 Compactación relativa

Se observó que el porcentaje de compactación relativa fue menor en ambas profundidades en el tratamiento que fue sometido a la labor de descompactación (SDD), en cambio en siembra directa (SD) la compactación relativa fue un poco mayor, los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla 5: Distribución del porcentaje de compactación relativa del suelo de acuerdo a la profundidad y el sistema de labranza utilizado.

Espesor (cm)	COMPACTACIÓN RELATIVA (%)	
	SD	SDD
0- 13	86,1 %	80,33%
13- 26	86%	81,08%

Las diferencias observadas en la compactación relativa del suelo no fueron tan marcadas entre los tratamientos, esto se atribuyó a que es el primer año que el lote es sometido a una labor de descompactación después de varios años de estar destinado a la actividad ganadera.

Resultados similares al presente trabajo fueron hallados por Alvarez *et al.* (2012 b), los cuales observaron diferencias en la compactación relativa en los primeros 20 cm entre los distintos tratamientos analizados. Muestrearon lotes en el sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, encontraron que la compactación relativa fue mayor en el tratamiento bajo manejo mixto en siembra directa (4 años de pasturas y 8 años de agricultura: MIXTOS-SD), la cual alcanzó un valor del 90 %. En el tratamiento bajo agricultura continua y siembra directa (AGR-SD) la CR fue del 87%, en cambio en el tratamiento bajo agricultura continua y laboreo conservacionista (AGR-LC) la CR fue un poco menor, alcanzando el 84%. Estos autores tomaron como valor de referencia la CR muestreada en distintos cascos de estancias, donde la misma fue del 78 %. Micucci y Taboada. (2006) tomaron como umbral de referencia el 90 %, valores iguales o mayores consideran que afectan el rendimiento de la mayoría de los cultivos.

Schmidt y Amiotti. (2012) también encontraron diferencias en la CR del suelo entre los tratamientos de siembra directa y labranza reducida. En SD la compactación relativa fue mayor en todas las profundidades consideradas (0-5, 5-10 y 10-18 cm), llegando a un valor máximo del 87% en el último espesor analizado.

3.2.6 Velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración no presentó diferencias entre tratamientos, por lo tanto no hubo un efecto marcado de la labranza de descompactación sobre esta variable (Tabla 6).

Tabla 6: Distribución de la velocidad de infiltración del suelo (mm/h) de acuerdo al sistema de labranza utilizado.

	SD	SDD	p- valor
Velocidad de infiltración.	34,75 a	47,07 a	0,1031

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre tratamientos (nivel de significancia: $\alpha=0,05$).

Si bien no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, la velocidad de infiltración fue mayor en el tratamiento de **SDD** respecto al tratamiento de **SD**. Esta diferencia puede atribuirse a un mayor estado de soltura de los agregados del suelo por el efecto de la herramienta. Resultados similares fueron encontrados por Guecaimburu *et al.* (2012) sobre un Argiudol típico que fué sometido a una labranza vertical después de varios años de siembra directa, el tratamiento SDP (siembra directa con paratill) presentó una mayor tasa de infiltración con respecto al tratamiento de SD (siembra directa). Por su parte, Reposo y Bonvecchi (2012) trabajando en un Argiudol típico observaron que la infiltración básica en el horizonte superficial presentó un incremento significativo en el tratamiento descompactado respecto al tratamiento de siembra directa sin descompactar.

Sanzano *et al.* (2008) concluyeron también que las mayores tasas de infiltración fueron significativamente mayores en los suelos que se utilizó el paratill respecto a aquellos suelos sin laboreo. En el tratamiento SD+P (lotes de más de 10 años de siembra directa + el uso del paratill) observaron que la infiltración fué más del doble en comparación al tratamiento de SD (lotes de más de 10 años de siembra directa, sin rotación y sin labranzas).

3.2.7 Número de lombrices

El número de lombrices no manifestó diferencia alguna entre los dos tratamientos, ya que la presencia de lombrices en el perfil estaría asociada más con la humedad que con el sistema de labranza utilizado. Los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla 7: Distribución del número de lombrices en los distintos tratamientos. (0-30 cm)

	SD	SDD	p- valor
Número de lombrices/m ²	26,67 a	24,67 a	0,6559

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre tratamientos (nivel de significancia: $\alpha=0,05$).

Masin *et al.* (2014) evaluaron el efecto del uso del suelo sobre comunidades de lombrices de tierra y observaron diferencias significativas por uso de suelo y no por estación del año. Encontraron que el sitio con uso Huerta Orgánica presentó los valores más altos para las variables densidad, riqueza y diversidad de lombrices respecto a los demás usos. Concluyeron que la composición específica de las comunidades de lombrices de tierra estuvo asociada a condiciones de fertilidad y estructura como también al uso e intensidad del suelo, siendo diferente a lo que se concluyó en el presente trabajo.

Sobre Haplustoles de bajo desarrollo en cercanías de las localidades de General Deheza y General Cabrera, Domínguez *et al.* (2009) estudiaron los cambios producidos en las comunidades de lombrices de tierra bajo situaciones de siembra directa y de pastizales naturales. Observaron que la siembra directa produjo cambios en las propiedades físico- químicas del suelo como reducción del Ph y de la materia orgánica del suelo, aumento de la compactación, entre otros. Estos cambios provocan ciertas modificaciones en el ambiente edáfico, por lo tanto se vuelve menos favorable para el desarrollo de lombrices de tierra, cuya abundancia, actividad y madurez se ven seriamente disminuidas. Esto no concuerda con lo encontrado en el presente trabajo, ya que el tratamiento SD presentó un número mayor de lombrices que SDD, sin evidenciarse diferencias significativas entre tratamientos. El hecho de no observar diferencias significativas entre las labranzas puede atribuirse a que es el primer año que se realiza una labor de descompactación subsuperficial y los efectos sobre la fauna edáfica del suelo pueden ser más significativos en los años siguientes.

3.3 Rendimiento del cultivo

El cultivo de maíz no evidenció diferencias significativas en cuanto a su rendimiento en los dos sistemas de labranza, esto puede atribuirse a que fué un año con una condición hídrica muy favorable (Anexo 2). Las diferencias en el rendimiento entre los tratamientos se observan en la siguiente tabla:

Tabla 8: Rendimiento del cultivo (qq/ha) en los dos tratamientos.

	SD	SDD	p-valor
Rendimiento	127,36 a	124,85 a	0,7198

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre tratamientos (nivel de significancia: $\alpha=0,05$).

Si bien el tratamiento **SD** presentó un rendimiento un poco mayor que **SDD**, esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Milanés *et al.* 2012, tampoco encontraron diferencias significativas entre SD, LV (Labranza vertical) y LC (Labranza convencional), el rendimiento fue levemente superior en el tratamiento de siembra directa.

Rodríguez *et al.* (2008) no observaron diferencias significativas en el rendimiento de maíz ni en seco ni bajo riego para LC, SD Y LV.

Resultados diferentes fueron hallados por Espósito *et al.* (2008), quienes observaron que el rendimiento en promedio de maíz en los ocho años analizados fue superior en SD fertilizada respecto a LR (Labranza reducida) y LC (Labranza convencional), en cambio en las parcelas no fertilizadas los niveles de producción fueron LC>LR>SD.

Rovera *et al.* (2014) también encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, resultando un 13,7 % superior el rendimiento de maíz en los tratamientos descompactados respecto a los sin descompactar. Además, la mayor diferencia en el rendimiento se presentó entre PP-CP (Siembra directa perpendicular a la pendiente con labor de descompactación) y AFP-SP (Siembra directa a favor de la pendiente sin labor de descompactación), lo que representó un 20% más de rendimiento por la acción conjunta de la labor de descompactación y la siembra perpendicular a la pendiente, respecto a las situaciones sin labor de descompactación y sembradas a favor de la pendiente.

3.4 Modelo COMPACTA FACE II

En base a la información obtenida a campo se obtuvo el ITA (Índice de transito agrícola) de cada implemento utilizado y el modelo arrojó el ITA total para el sistema de labranza utilizado. Los resultados pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Tabla 9: Índice de tránsito agrícola (ITA) para cada uno de los implementos utilizados en el tratamiento de SD.

Maquinaria utilizada	N° de pasadas.	Ancho (m).	Peso Cargado (t).	Peso Descargado (t).	Peso promedio (t)	ITA (Mg. km. ha ⁻¹)
Tractor siembra	1	4	5	5	5	12,5
Sembradora	1	7,35	3	2	2,5	3,40
Cosechadora	1	9,5	13	10	11,5	15,64
ITA TOTAL:						31,54

El valor de ITA total calculado es de 31,54 Mg.km.ha⁻¹, lo que indica, de acuerdo a Pozzolo e Iruetia (2012), que la intensidad de tránsito es moderada, ya que el valor se encuentra comprendido entre 23 y 79 Mg.km.ha⁻¹, esto está asociado a un planteo de siembra directa con bajo número de maquinarias y tránsito de cada una de ellas ya que no se realizó re fertilización y tampoco se realizaron aplicaciones para contrarrestar el ataque de plagas y enfermedades.

A la hora de realizar las simulaciones, el modelo pide una cierta cantidad de datos generales y también pide especificar las rotaciones de cultivos que se consideraron. En la siguiente tabla se indican los datos generales que han sido utilizados a la hora de realizar las corridas con el modelo (Tabla 10).

Tabla 10: Datos generales considerados para las corridas realizadas en el modelo Compacta Face II.

Datos	Característica seleccionada.
Textura.	Textura gruesa. Suelo franco- arenoso.
Humedad para RM.	(< 14 %). Suelo seco. (I)

Compactación relativa.	86%
Estructura superficial.	E3 (No hay estructura laminar o planar).
Intensidad de tránsito agrícola.	M (Moderada). Sistema de moderada intensidad de tránsito.
Huellado del terreno.	Ho. No se visualiza huellado en superficie.
Resistencia mecánica.	4010 KPa.
Infiltración.	34,75 mm/h.
Presencia de insectos y lombrices.	30 individuos/ m ² .

Con respecto a las rotaciones de los cultivos que fueron consideradas en las corridas del modelo, cabe destacar que se tomó el mismo período de tiempo (4 años) para las tres opciones analizadas. Las distintas rotaciones que se utilizaron pueden observarse en la siguiente tabla:

Tabla 11: Tipo de rotaciones utilizadas en las distintas corridas del modelo Compacta Face II.

Tipo de rotaciones utilizadas.	Período de tiempo y cultivos utilizados.	Rendimiento relativo.
a) Monocultivo, soja o similar.	(4 años). Soja-Soja-Soja- Maíz	Normal.
b) Rotación agrícola ganadera, cultivos y pasturas.	(4 años) Soja- Trigo- Maíz- Trigo	Normal (Soja y maíz). Bajo (Trigo)
c) Rotación agrícola con participación importante de trigo, maíz y/o sorgo.	(4 años) Maíz- Maíz- Maíz- Soja	Normal.

Se realizaron las corridas del modelo para las distintas rotaciones consideradas anteriormente, los resultados fueron muy diferentes en las tres alternativas. Para la primer alternativa (Opción a), el modelo arrojó un resultado muy alto debido a la inclusión de varios años en la rotación del cultivo de soja, el resultado final fue de **126,769 (R4)**, indicando que es necesaria la labor de descompactación ya que se puede obtener una respuesta productiva muy importante. En la opción b, al incluir más gramíneas en la rotación, el resultado fue muy diferente; en este caso el modelo arrojó un resultado final de **60,1028 (R1)**, recomendando también la labor de descompactación debido a que existe una respuesta productiva leve. El resultado de la tercera alternativa (Opción c) fue aún más bajo, llegando a **58,1028 (N)**, indicando en este caso que no es necesaria una labor de descompactación ya que la misma tendría un efecto neutro a leve, el modelo solamente sugiere una rotación de cultivos.

Como puede observarse, existió una gran diferencia en los resultados arrojados por el modelo según el tipo de rotación utilizada. Sin dudas, una mayor incorporación de gramíneas en la rotación promueve a disminuir el efecto compactativo del suelo, esto puede deberse a la mayor relación C/N de los rastrojos que promueven a la formación de materia orgánica más estabilizada en el suelo. Todo lo contrario ocurre al incluir el cultivo de soja durante varios años consecutivos, ya que la relación C/N es más baja que la de las gramíneas.

Una limitante muy importante que presenta este modelo es que no permite incluir en las rotaciones aquellas pasturas utilizadas en la actividad ganadera tales como alfalfa, ni tampoco permite incluir ciertos verdeos de invierno tales como avena, cebada, centeno, entre otros. Para aportar datos más certeros y precisos en una situación agrícola- ganadera, el modelo debería incluir estos cultivos al igual que la carga animal utilizada, categoría de animales, tiempo de pastoreo, etc.

Si bien este modelo desarrollado por el INTA no está validado aún para la región Pampeana Sur, puede servir como una herramienta útil al interpretar la realidad actual del suelo para las condiciones dadas.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

- La aplicación de una labor de descompactación mejora la condición física del suelo ya que se observa una disminución importante de la resistencia mecánica principalmente en los primeros 20 cm del perfil.
- La labor de descompactación subsuperficial provoca una marcada disminución de la densidad aparente del suelo en los primeros estratos y como consecuencia genera una compactación relativa menor comparado con un sistema de siembra directa.
- El subsolado del perfil genera una mayor velocidad de infiltración para el tratamiento SDD, sin presentar diferencias estadísticamente significativas con el tratamiento SD.
- La labor de descompactación no genera diferencias significativas en el número de lombrices encontradas.
- La aplicación de una labor de descompactación subsuperficial bajo un sistema de siembra directa, para las condiciones ambientales prevalecientes durante el presente estudio, no provoca efecto sobre el rendimiento del cultivo de maíz.
- El modelo Compacta Test del INTA constituye una herramienta interesante para evaluar la necesidad de descompactación, al integrar un conjunto de indicadores físicos y biológicos del suelo que tienen impacto en la calidad del ambiente para la producción de cultivos y la sustentabilidad de los recursos naturales. Sin embargo, presenta limitaciones en cuanto a las rotaciones de cultivos que considera, por lo que requiere de su calibración y validación para la región pampeana subhúmeda.

CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA CORDOBA AMBIENTE – INTA EEA MANFREDI. 2006. Recursos naturales de la provincia de Córdoba: los suelos. Nivel de reconocimiento escala 1:500000.

ALVAREZ, C.R.; M. TORRES DUGGAN; E. CHAMORRO; D. D'AMBROSIO y M.A TABOADA.2008. Efecto de la descompactación sobre algunas propiedades edáficas y el rendimiento de maíz en planteos de siembra directa. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

ALVAREZ, M.F.; M.L OSTERRIETH y J.L DEL RIO.2008.Efecto de distintos usos del suelo sobre propiedades físicas de argiudoles típicos del sudeste bonaerense. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

a). ALVAREZ, C.R.; M.A. TABOADA y S. PERELMAN. 2012. Condición estructural de los suelos bajo siembra directa: Caracterización y Génesis. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

b). ALVAREZ, C.R; P.L FERNANDEZ y M.A TABOADA.2012. Estabilidad estructural: Efecto del manejo y su relación con las propiedades edáficas. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

BERGESIO, L.2011. Persistencia del aflojamiento producido por una labor de descompactación en un sistema de producción mixto en un Haplustol típico del sur Cordobés. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 42 p.

BONADEO, E; A. CANTERO e I. MORENO.2003. Relación entre la compactación subsuperficial y la resistencia a la penetración de un Hapludol típico con las raíces de maní (*Arachis hypogaea* L.) Rev. Univ. Nac. de Río Cuarto (1-2):23-36.

BONEL, B.; J.DENOA; M.COSTANZO y G. GUIBILEO.2002. Evaluación de la labor de escarificado en siembra directa. XVIII Congreso Nacional de la Ciencia de Suelos, Puerto Madryn, Chubut – 2002.

BOONE, FR; KH, VAN DER WERF; B, KROESBERGEN; BA TEN HAG & A BOERS. 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I. Mechanical impedance. Netherlands Journal of Agricultural Science.

BRUSASCA, D. 2013. Evolución del efecto de descompactación subsuperficial en un Hapludol típico manejado en siembra directa con mínimo tráfico agrícola. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.

CACCIAVILLANI, M. 2009. Evolución del comportamiento físico de un suelo Haplustol típico de Córdoba bajo dos sistemas de laboreo. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.

CANTERO, A. G.; E. M. BRICCHI; V. H. BECERRA; J. M. CISNEROS y H. A. GIL. 1986. Zonificación y descripción de tierras del departamento Río Cuarto (Córdoba). 1º ed. UNRC. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

CARTER, M. R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage Studies. Can. J. Soil Sci. 70:425-433.

CERISOLA, C.; V, SANCHEZ-GIRON; M, GARCIA; R, FILGUEIRAS y J.L HERNANZ.2000. Agua acumulada en un perfil de un suelo sometido a tres sistemas de labranza. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2000.

CHOLAKY, C.; J.CISNEROS y R.BALBUENA.2002.Descompactacion de suelos del área núcleo manisera con subsolador alado, en función de la humedad y compactación antecedente. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina-2002.

CHOLAKY, C. 2003. Efectividad y persistencia de una labor de descompactación con subsolador alado en función de la compactación y humedad antecedentes. Tesis de Maestría en Manejo y Recuperación de Tierras. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto. Argentina: 196 p.

CHOLAKY, C; J. M CISNEROS y R. H BALBUENA. 2005. El perfil cultural: una herramienta para discriminar modificaciones en la estructura edáfica producidas por una labor profunda. Revista de la Universidad Nacional de Río Cuarto 25 (1): 53-83.

CISNEROS, J; DEGIOANNI, A; GONZALEZ, J; CHOLAKY, C; CANTERO J.J; CANTERO, A y J. TASSILE.2015. Erosión y degradación de suelos. Provincia de Córdoba. En: El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. R. Casas y G. Albarracín (eds.) FECIC, Tomo2, Buenos Aires, Argentina:456 p.

DEBELIS, S.P; L.A BARBOSA; M.C GAGEY; M.B BARRIOS; I.R PALADINO; A. BUJAN y H.A RODRIGUEZ. 2014. Distribución espacial de la resistencia a la penetración según sistema de labranza. XXIV Congreso Argentino de la ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina – 2014.

DIAZ-ZORITA, M.2000.Compactacion subsuperficial de un hapludol típico y producción de girasol en la región sub húmeda pampeana, Argentina. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2000.

DI RIENZO J.A.; F. CASANOVES; M.G. BALZARINI; L. GONZALEZ; M. TABLADA y C.W. ROBLEDO. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. En: <http://www.infostat.com.ar>. Consultado: 26/08/2013.

DOMINGUEZ, A.; J.C BEDANO; A.R BECKER y B.J PARRA.2008.Efecto del sistema de siembra directa sobre la macro fauna edáfica en la cuenca Gral. Deheza, Córdoba. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

DOMINGUEZ, A; J. C BEDANO y A.R. BECKER.2009. Cambios en la comunidad de lombrices de tierra (Annelida: Lumbricina) como consecuencia del uso de la técnica de siembra directa en el centro-sur de Córdoba, Argentina. C₁.SUELO (ARGENTINA) 27(1): 11-19.

DRAGHUI, L; BOTTA, G; BALBUENA, R; CLAVERIE, J & ROSATTO, H (2005). Diferencias de las condiciones mecánicas de un suelo arcilloso sometido a diferentes sistemas de labranza. R. Bras. Eng. Agric. Ambiental, 9, 120-124.

ECHEVERRIA, N.E; F.M ROHLMANN; J.C SILENZI; A.G VALLEJOS y M. DE LUCIA.2008. Descompactación de un suelo de la región semiárida argentina bajo agricultura continua. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

ELISSONDO, E.; J.L COSTA; E.SUERO; K.P FABRIZZI y F.GARCIA.2012.Evaluación de algunas propiedades físicas de los suelos en sistemas de labranza reducida y siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

ESPOSITO, G. P; C. A CASTILLO; E. BRICCHI; R. BALBOA y M. ETCHEVERRY.2008. Productividad de maíz y propiedades químicas del suelo afectadas por su uso, tipo de labranza y fertilización. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

FAITA, E.C y J.M CISNEROS.2008.Sistemas de laboreo y comportamiento de suelos de la pampa ondulada bonaerense: I. Propiedades físicas y producción de maíz. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

FAITA, E.C.; A. BOYADJIAN y M.A ROS.2012.Efecto de labranza vertical sobre propiedades edáficas y rendimiento en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

GARCIA PITA, M. 1985. Iniciación al estudio de la compactación de los suelos gallegos. Tesis Fac. Farm., Santiago de Compostela.

GAUTRONNEAU Y. y H. MANICHON 1987. Guide methodologique du profil cultural. Cerefgeara, 71 pp.

GONZÁLEZ CUETO, O; C. E IGLESIA CORONEL y M. HERRERA SUAREZ.2009.Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 18, núm. 2, pp 57-63. Universidad agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez Cuba.

GUECAIMBURU, J.M; R. M INTROCASO; V. ROJO; E. WASINGER y M. REPETTO 2012. Impacto multitemporal de la labranza vertical en siembra directa sobre parámetros edáficos. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

HIDALGO, R.; O. POZZOLO; H.SANTAJULIANA; F. DOMINGUEZ; G. BOTTA y C.CURRO 2010. Cosecha de soja. Efectos sobre la compactación del suelo. XX Congreso Argentino de Mecánica de suelo e Ingeniería Geotécnica, Mendoza, Argentina-2010.

INTA VILLEGAS.2010.Manual penetrómetro modelo INTA Villegas.

KIESSLING, R.J; J.A GALANTINI; J.O IGLESIAS; H.KRUGER y S.VENANZI .2008. Efecto del pisoteo animal sobre la porosidad del suelo en lotes bajo siembra directa continua. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

KLUTE, A. (Ed.) 1986.Methods of soil análisis. Agronomy Am. Soc. Of Agronomy, Inc. Soil Sci. Soc. Of Am Inc. Madison, Wisconsin, USA.

LOZANO, L.A; C.G SORACCO; G.O SARLI; R.R FILGUEIRA y D. GABRIELS. 2012. Anisotropía de la porosidad del suelo. Su estudio en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

MARTINEZ, D.A.; A.M LANDINI; E.L SOZA; D.W AGNES y O.S HEREDIA.2008. Sistemas de producción animal parte I: Incidencia de la carga animal sobre las condiciones físicas del suelo. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

MASIN, C. E; M. I MAITRE; A. R RODRIGUEZ; M. S CRUZ; M.J DEMONTE; L.A VUIZOT y F. R MOMO. 2014. Efecto del uso del suelo sobre comunidades de lombrices de tierra. XXIV Congreso Argentino de la ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina – 2014.

METTAUER, H; Y. TUAL; CH. HUCK Y R. TRENDEL.1983.De la connaissance du comportement physique et mécanique des sols de l 'Est de la France. Agronomie 3, 141-152.

MICUCCI, F. y M. A. TABOADA. 2006. Soil physical properties and soybean root abundance in convencionally-and-zero tilled soils in the humid Pampas of Argentin. Soil Till. Res. 86: 152-162.

MILANÉS, L; M.V BASANTA y C.R.C VEGA.2012. Comportamiento del cultivo de maíz en diferentes sistemas de labranza. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

PAREDES, D.; M.A ROBA; J.P D´AMICO; A. ROMITO; R.G FLOREAN; J.M CURA y M.O TESOURO.2009.Labranza vertical: Efecto sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de soja (Glycine max) bajo diferentes grados de compactación. En: <http://inta.gob.ar/documentos/labranza-vertical-efecto-sobre-las-propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-rendimiento-del-cultivo-de-soja-glycine-max-bajo-diferentes-grados-de-compactacion/>. Consultado: 28/07/13

PARRA, B.J; A.R BECKER y M.P CANTÚ.2008. Evaluación de la compactación de Haplustoles del área de General Deheza. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

PEIRONE, L.S;M.V BASANTA;E.LOVERA;J.P GIUBERGIA y C. ALVAREZ 2008. Propiedades químicas y densidad aparente de un Haplustol del centro sur de la provincia de Córdoba bajo siembra directa y labranza convencional. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

PERROUX, K. M. y I. WHITE. 1988. Design for disc permeameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1205-1215.

POZZOLO, O.R y C.B IRURTIA.2012.Compacta test: herramienta de diagnostico para determinar la compactación de los suelos. En: <http://inta.gob.ar/documentos/herramienta-de-diagnostico-para-determinar-la-compactacion-de-suelos>. Consultado: 20/08/2013

PRÍNCIPE, L. G. 2011. Evaluación de la compactación y descompactación en un Hapludol típico sometido a una historia de siembra directa. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.

RAPER, R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil Journal of Terramechanics 42: 259–280

REPOSO, G.P y V.E BONVECCHI.2012. Efectos de la descompactación sobre propiedades físicas de un suelo franco limoso. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

RODRIGUEZ, S; G.A STUDDERT; H.E ECHEVERRIA y S. BORDENAVE. 2008. Sistemas de labranza y nutrición nitrogenada de maíz (Zea mays L.) en el sudeste bonaerense. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

RODRIGUEZ, H.A; M.S GILARDINO; S.P DEBELIS; I.R PALADINO; J. DE GRAZIA; M.B BARRIOS; A. BUJÁN y A.C SOKOLOWSKI. 2014. Estabilidad de los agregados bajo labranzas contrastante en un Argiacuol vértico. XXIV Congreso Argentino de la ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina – 2014.

ROLLÁN, A; KARLIN, M. S & BACHMEIER, O. 2004. Siembra directa y densificación subsuperficial en Molisoles del centro norte de Córdoba. In Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Entre Ríos. Argentina.

ROVERA, J; C.CHOLAKY; J.CISNEROS; J.GONZALEZ y L. BERGESIO.2014.Descompactacion y dirección de siembra: Efecto sobre propiedades hídricas y rendimiento de maíz. XXIV Congreso Argentino de la ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina – 2014.

SANZANO, G. A; F. SOSA; A.J HASÁN; C.F HERNANDEZ; M. MORANDINI; H. ROJAS QUINTEROS y W. RODRIGUEZ.2008. Efecto del paratill en las propiedades físicas de los suelos en siembra directa en monocultivo de soja y rotación soja-maíz. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

SASAL, M.C.; A.E ANDRIULO; J. LEONARD y M.J WILSON.2012.El estado estructural como indicador de calidad del suelo bajo siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

SCHMIDT, E y N. AMIOTTI.2012. Estabilidad estructural y compactación relativa bajo siembra directa y labranza reducida. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina-2012.

SEILER, R.A.; R.A FABRICIUS; V.H ROTONDO y M.G VINOCUR.1995. Agroclimatología de Rio Cuarto 1974/1993 Volumen I. Rio Cuarto, Córdoba, Argentina.

SORACCO, C.G.; R.R FILGUEIRA; G.O SARLI; L.L FOURNIER y P.R GELATI.2008.Efecto del tránsito sobre el movimiento del agua en un suelo bajo siembra directa. . XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

SOZA, E.L.; D.W AGNES; M.C TOURN y G.F BOTTA.2008. Descompactación del suelo y su efecto en la implantación y rendimiento de un cultivo de soja. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina- 2008.

TABOADA, M.A y F.G MICUCCI.2002. Respuesta de raíces de soja a impedancias en Molisoles y Vertisoles, bajo labranza convencional y siembra directa. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina-2002.

VENANZI, S.; A.VALLATI y H. KRÜGER. 2001. Crecimiento temprano del trigo en función de la densidad aparente del suelo. V Congreso Nacional de Trigo. Villa Carlos Paz. 2001.

WILLIANS, J y R.REYES.2010.Evaluación de la susceptibilidad a la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. Bioagro 22(1): 29-36.

ANEXOS

1. Características morfológicas y analíticas del perfil representativo

Haplustol típico

Es un suelo bien drenado a algo excesivamente drenado, desarrollado sobre materiales franco arenoso y vinculado a lomas arenosas ligeramente onduladas con pendientes del 1%. El horizonte superficial de 24 cm de espesor, es de color pardo grisáceo oscuro, de textura franco arenosa y estructura en bloques moderados. Hacia abajo, pasa claramente a un horizonte B color (no textural), de color pardo oscuro y estructura en prisma y bloques débiles. El horizonte C (material originario) se encuentra a una profundidad de 57 cm, es de color pardo amarillento oscuro, textura franco arenosa y con abundante calcáreo pulverulento en la masa del suelo a partir de los 95 cm de profundidad.

Estos suelos son aptos para la agricultura aunque se encuentran limitados climáticamente. Presentan una moderada retención de humedad y moderada estructura superficial.

Datos analíticos.

Perfil.	A ₁	B	C ₁	C _{2ca}
Profundidad de la muestra (cm)	0-24	24-57	57-95	>95
Materia orgánica (%)	1.94	0.62		
Carbono orgánico (%)	1.12	0.36		
Nitrógeno total (%)	0.116	0.057		
Relación C/N	9.6	6.3		
Arcilla (<2μ) (%)	10.6	11.8	7.9	6.5
Limo (2- 50μ) (%)	27.7	24.1	24.1	29.6
Arena muy fina (50-100 μ) (%)	28.2	24.5	30.5	34
Arena fina (100-250 μ) (%)	27.9	35.8	32.5	3.6
Arena media (250-500 μ) (%)	2.8	1.5	1.4	2.1
Arena gruesa (500-1000 μ) (%)	2.4	2.5	2.9	
Arena muy gruesa (1000-2000 μ) (%)	0.1			
Gravas (> 2000 μ) (%)				
CaCO ₃ (%)	2.2			
Equivalente de humedad (%)	13.8	12	9.3	9.7

pH en pasta	6.3	6.5	7	7.6
pH en H ₂ O (1: 2,5)	6.5	6.7	7.2	7.9
Cationes de cambio (meq/ 100gr)	Ca ⁺⁺	5.8	6.5	6.3
H ⁺ cambio (meq/ 100gr)	0.7	0.7	1.1	
	0.3	0.2	0.2	
	2.9	1.3	0.7	0.3
	0.7	0.4		
Conductividad eléctrica (mmhos/cm)				
Valor S. suma de bases (meq/ 100gr)	9.7	8.7	8.3	
Valor T. CIC (meq/100gr)	10	9.5	8.7	
Saturación de bases S/ T (%)	88	91	95	

Descripción del perfil típico:

El perfil típico, fue descripto a 13 Km al Norte de Italó, departamento General Roca, provincia de Córdoba y corresponde con la serie Italó, descripta en la hoja 3563-14 Buchardo de la serie Editorial Cartas de suelos de la República Argentina (INTA- ACASE), escala 1: 50000.

Horizonte
A1

Profundidad
0-24 cm

Descripción
Color pardo oscuro a pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2,5) en húmedo; franco arenosa; estructura en bloques subangulares medios moderados; duro en seco; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; límite inferior claro suave.

B

24-57 cm

Color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo; franco arenosa; estructura en prismas y bloques medios, débiles, friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; vestigios de

C1 57-95 cm

barnices (“ClaySkins”) muy finos; límite inferior gradual, suave.

Color pardo amarillento oscuro (10YR3, 5/4) en húmedo; franco arenosa; estructura masiva; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; límite inferior abrupto, suave.

C2ca + 95 cm

Color pardo amarillento oscuro (10YR3, 5/4) en húmedo; franco arenosa; estructura masiva; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; abundante calcáreo pulverulento diseminado en la masa del suelo.

2. Precipitaciones en el período 2013-2014.

2013												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	145	28	108	65	7	0	0	0	10	125	156	122
2014												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	85	235	71	125	31	7	0	0	62	60	150	75