

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DIRECTO Y RESIDUAL DE LA DESCOMPACTACIÓN
SUBSUPERFICIAL SOBRE EL CULTIVO DE SOJA

por

Rodrigo FERREIRA PANISSA
Fernando ROSTÁN CHATEL

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el título
de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2017

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. (PhD.) Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr. (Dra.) Mónica Cadenazzi

Fecha: 25 de mayo de 2017

Autores:

Rodrigo Ferreira Panissa

Fernando Rostán Chatel

AGRADECIMIENTOS

Gracias al apoyo incondicional de nuestras familias que fueron sostén fundamental, a la colaboración de los ayudantes de cátedra Ramiro y Pilar, y de manera especial gracias al profesor Oswaldo Ernst.

También el agradecimiento a la Asociación Uruguaya pro Siembra Directa (AUSID) por contribuir a que este trabajo sea posible.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. COMPACTACIÓN DEL SUELO	3
2.1.1. <u>Trafico de maquinaria como causa de la compactación de suelo</u> ...	3
2.1.2. <u>Propiedades físico-químicas de suelos compactados</u>	4
2.2. CRECIMIENTO DEL CULTIVO EN SUELOS COMPACTADOS	13
2.2.1. <u>Crecimiento radicular</u>	13
2.3. TRATAMIENTO DE SUELOS COMPACTADOS.....	15
2.3.1. <u>Efecto de la descompactación de suelos</u>	15
2.3.2. <u>Control del tráfico de maquinarias</u>	16
2.4. HIPÓTESIS	18
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	19
3.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ENSAYO.....	19
3.1.1. <u>Descripción del sitio experimental</u>	19
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	19
3.1.3. <u>Diseño experimental</u>	20
3.1.4. <u>Manejo del cultivo</u>	21
3.1.5. <u>Muestreos</u>	21
3.1.6. <u>Análisis estadístico de los resultados</u>	23
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	24
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	24

4.2. EFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN SOBRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE Y RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO	25
4.3. EFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN SOBRE EL CULTIVO	27
4.4. RESPUESTA ESPACIAL A LA DESCOMPACTACIÓN	31
4.4.1. <u>Efecto sobre las características físicas del suelo</u>	32
5. <u>CONCLUSIONES</u>	38
6. <u>RESUMEN</u>	39
7. <u>SUMMARY</u>	40
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	41

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo	6
2. Manejo del cultivo	21
3. Variables descriptivas del estado del suelo para los dos tratamientos con efecto residual y directo.....	25
4. Respuesta del cultivo al tratamiento de descompactación sub-superficial	27
5. Variables de rendimiento para los dos años con sus respectivos tratamientos	28
6. Características descriptivas del suelo por zona de respuesta a la descompactación con sus respectivos tratamientos	34
7. Respuesta del cultivo a la descompactación según zona de evaluación.....	36
8. Componentes del rendimiento de soja por zona.	36
Figura No.	
1. Impacto del laboreo con grada sobre la compactación y la porosidad estructural.	8
2. Efecto de la densidad aparente y de la tensión de humedad en la resistencia del suelo a la penetración y en el alargamiento de las raíces. ...	9
3. Perfiles de estructura de suelos.	10
4. Mapa de diseño del ensayo y grilla de muestreo.	20
5. Precipitaciones decádicas entre el 11/15 y el 5/16, media histórica de precipitaciones para el mismo período y ubicación temporal del ciclo del cultivo.....	24
6. Perfil de Rp. medio y desvío estándar por punto para el año 1 y año 2 con sus respectivos tratamientos.....	26
7. Rto. para el año 2 en relación a la Rp. de 8-30cm para los dos tratamientos.....	29

8. Rto. para el año 1 en relación a la Rp. de 8-30cm para los dos tratamientos.....	30
9. Mapa de zonificación definida por la resistencia a la penetración del suelo en el estrato 8-30cm de profundidad.	31
10. Perfiles de resistencia a la penetración para las tres zonas.....	32

1. INTRODUCCIÓN

A partir del 2002 la agricultura en Uruguay se ha intensificado y expandido. La superficie que afecta a la producción de cultivos anuales crece continuamente, provocando la intensificación en el área agrícola y desplazando al sistema tradicional de la producción agrícola – ganadero por un sistema de agricultura continua, realizado en un 90% de la superficie con siembra directa sin laboreo.

Este proceso generó problemas de compactación de suelos asociados a la disminución en el contenido del carbono del suelo, aumento de la erosión y del tráfico de maquinaria pesada.

Como resultado de la compactación del suelo; se incrementa la resistencia a la penetración, y el intervalo hídrico óptimo del suelo, afectando negativamente al crecimiento y desarrollo radicular de las plantas y el rendimiento en grano del cultivo.

Considerando que en Uruguay la principal causa de degradación de los suelos es la erosión hídrica, el uso de labranza sub superficial tipo paraplow o paratill para descompactar el suelo y mejorar los rendimientos de los cultivos parece una mejor opción que la labranza convencional, ya que afecta de forma mínima la cobertura del suelo, evitando exponer la superficie del suelo a la erosión hídrica.

Los objetivos del trabajo son evaluar el efecto del uso de un subsolador tipo paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo; identificar zonas con respuesta diferencial a la descompactación cuantificando la respuesta en crecimiento y rendimiento de soja; cuantificar la duración del efecto positivo de la descompactación sobre la resistencia a la penetración del suelo y sobre el cultivo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La creciente población del mundo necesita de una intensificación de la agricultura para abastecer la demanda de alimentos que también crece. En consecuencia de esto, se utiliza maquinaria agrícola de mayor peso transitando varias veces sobre la misma superficie de suelo en la mayoría de las zonas agrícolas del mundo. Esta intensificación de la agricultura ha llevado a la compactación y al deterioro de la fertilidad física del suelo. Las zonas compactadas pierden fertilidad física en sus suelos debido a la disminución de la capacidad de almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, por aumento de la densidad del suelo, disminución de la macroporosidad, aumento de la resistencia del suelo y disminución de la infiltración de agua. Como consecuencia es necesario aumentar el uso de los fertilizantes, provocando una reducción de la eficiencia de uso de los mismos y contaminación ambiental indeseables (Hamza y Anderson, 2005).

La compactación es un proceso por el cual las partículas del suelo son reubicadas para ocupar los espacios vacíos, quedando en estrecho contacto entre sí. Esto genera un aumento de la densidad aparente y altera la disposición espacial, tamaño y forma de los agregados y en consecuencia, se reduce el espacio poroso, tanto dentro como entre estas unidades (Defosse y Richard, citados por Hamza y Anderson, 2005).

El uso excesivo de maquinaria pesada, la agricultura intensiva, la rotación de cultivos semestrales, el pastoreo intensivo y el uso inadecuado del suelo conduce a la compactación (Hamza y Anderson, 2005). Esto genera un severo disturbio sobre la estructura del suelo, lo que lleva a través de los años a su compactación. Lipiec y Stepniewski, citados por Jagdish et al. (2015) analizaron que la compactación del suelo como resultado del constante tráfico de vehículos o sistemas de labranza convencional, afecta el ciclo de los nutrientes debido a cambios en el contenido de agua del suelo, aireación y propiedades difusivas, así como por su efecto sobre el crecimiento y la configuración de las raíces.

2.1. COMPACTACIÓN DEL SUELO

2.1.1. Tráfico de maquinaria como causa de la compactación de suelo

La compactación excesiva causada por el tránsito de maquinarias pesadas constituye un gran problema en los suelos agrícolas de diversas regiones del mundo (Gupta y Allmaras, Spoor, Hamza y Anderson, citados por Álvarez et al., 2009).

Experimentos realizados por Chygarev y Lodyata, citados por Hamza y Anderson (2005) han demostrado que todos los parámetros del suelo se perjudican después de la pasada de un tractor. Vinculado a esto existe una disminución de la porosidad del suelo localizada en la zona por debajo de la pasada de la rueda (Hamza y Anderson, 2005). Los suelos sobre-compactados se encuentran generalmente en las “cabeceras” de los potreros (límites de los potreros) (Cyganow y Kloczkow, citados por Hamza y Anderson, 2005), y está más influenciada por el peso individual del eje y el número de neumáticos por herramienta durante las operaciones agrícolas (Canillas y Salokhe, citados por Jagdish et al., 2015).

Si bien se conoce que si se compara la siembra directa con la labranza convencional, la primera tiende a mejorar las propiedades del suelo, existen resultados que demuestran lo contrario, en cuanto a sus efectos en algunos parámetros físicos; como por ejemplo algunos autores indicaron un aumento en la compactación del suelo (Ferrerías et al., Lampurlanés y Cantero-Martínez, citados por Vallejos et al., 2014). En este mismo sentido Domínguez et al., citados por Draghi et al. (2005) han registrado una mayor acumulación de compactación superficial y una mayor capacidad portante en suelos bajo siembra directa. Por lo que el sistema de labranza cero no es ajeno al problema de compactación ligado al tráfico de maquinarias agrícolas. Se ha estimado que en siembra directa (1 pasada de maquinaria en la siembra) más del 30 % del suelo agrícola está bajo los efectos del pisoteo de la maquinaria agrícola (Tullberg, citado por Hamza y Anderson, 2005). Si se consideran 2 o 3 pasadas de maquinaria es probable que el porcentaje supere el 60%. Ya en labranza convencional el porcentaje estimado sería superior al 100% durante un ciclo de cultivo (Soane et al., citados por Hamza y Anderson, 2005). Si bien el número de pasadas (intensidad del tráfico) tiene un papel importante en la compactación del suelo, se sabe que la primer pasada es la que causa la mayor parte del total de la compactación (Bakker y Davis, citados por Hamza y Anderson, 2005).

Sumado a esta temática también se encuentra un incremento del peso de la maquinaria usada, que combinada en muchas veces con la alta humedad del suelo generan una mayor compactación del mismo (Alakukku et al., citados

por Soracco et al., 2009) y si a su vez se le suma la alta presión en los neumáticos el problema aumenta (Botta et al., citados por Álvarez et al., 2009), la cual es el problema que enfrentan todas las maquinarias ya que la mayoría de los modelos de tractores y máquinas tienen presiones por encima de los límites máximos (Hetz, citado por Hamza y Anderson, 2005). Arvidsson, citado por Jagdish et al. (2015) estudió que para generar diferencias detectables en las propiedades físicas de los suelos a 50 cm de profundidad (2-65% contenido de arcilla) es necesario 10 Mg/eje y al menos una presión de inflado de 300 KPa.

2.1.2. Propiedades físico-químicas de suelos compactados

El efecto de la compactación afecta el crecimiento vegetal por su efecto sobre el suministro de agua y nutrientes. Gil et al., citados por Imvinkelried et al. (2011) pudieron comprobar que como consecuencia de la reducción de la tasa de infiltración aumentan las pérdidas por escurrimiento y disminuye el agua disponible para los cultivos en crecimiento comprometiendo la productividad del mismo.

Las propiedades físico-químicas del suelo que más se afectan por la compactación son: estructura, porosidad, velocidad de infiltración, capacidad de retención de agua, densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración (Lampurlanés y Martínez, citados por Vallejos et al., 2014), así como la mineralización de carbono orgánico, el nitrógeno y la concentración de dióxido de carbono en el suelo (Conlin y Driessche, citados por Hamza y Anderson, 2005).

2.1.2.1. Densidad aparente

La densidad aparente del suelo puede ser alterada por el pisoteo de animales, tráfico de maquinaria agrícola y clima (por ejemplo por el impacto de las gotas de lluvia), etc. Partes compactadas del suelo tienen altas densidades aparentes y a su vez estos restringen el normal crecimiento de las raíces y no permiten el movimiento del aire y el agua a través del suelo (Arshad et al., 1996).

La densidad aparente depende de la densidad de las partículas que componen el suelo ya sea arena, limo, arcilla y materia orgánica y de su tipo de empaquetamiento. Las densidades de las partículas minerales anteriormente mencionadas usualmente se encuentran en el rango de entre 2.5 a 2.8 g/cm³, mientras que las partículas de materia orgánica presentan usualmente menos que 1.0 g/cm³ (USDA, 1999).

El nivel al cual la densidad aparente del suelo afecta el crecimiento depende de la textura del suelo, por lo que existen valores de referencia para distintas texturas (Cuadro No. 1). En general las densidades aparentes del suelo fluctúan entre 1.0 y 1.7 g/cm³ y lo lógico sería pensar que a mayor profundidad en el perfil mayor tendría que ser la densidad.

En suelos que contienen elevadas proporciones de arcillas expandibles las densidades aparentes tienden a variar con el contenido del agua, el cual debería ser medido al momento del muestreo (Arshad et al., 1996). Daddow y Warrington, citados por Draghi et al. (2005) establecieron que valores en el entorno de 1,65 Mg.m³ es el umbral de densidad aparente para permitir el normal crecimiento de las raíces. Numerosos experimentos han establecido rangos de resistencia a la penetración que serían responsables de causar restricciones para el normal desarrollo radicular. Por ejemplo Threadgill, citado por Draghi et al. (2004) fija 1.5 MPa y 2.5 MPa como valores responsables del desarrollo anormal y de la detención del desarrollo radicular respectivamente para el caso de árboles frutales. A su vez también Sur et al., citados por Jagdish et al. (2015) experimentaron que en suelos de textura franco arenoso valores de densidad aparente superiores a 1.55 Mg.m³ en la capa del subsuelo disminuyen el almacenamiento de agua en aproximadamente 20-30 mm. en todo el perfil del suelo.

Cuadro No. 1. Relación general entre densidad aparente (D.A.) del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo.

Textura del suelo	Densidad aparente ideal (g/cm ³)	D.A. que puede afectar el crecimiento radicular (g/cm ³)	D.A. que restringe el crecimiento radicular (g/cm ³)
Arena, areno-franco	<1,60	1,69	>1,80
Franco-arenosa, franco	<1,40	1,63	>1,80
Franco-arcilla-arenosa, franco, franco-arcillosa	<1,40	1,60	>1,75
Limosa, franco-limosa	<1,30	1,60	>1,75
Franco-limosa, franco-arcillo-limosa	<1,40	1,55	>1,65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa, algunas franco-arcillosas (35 - 45% de arcilla)	<1,10	1,39	>1,58
Arcillosa (>45% de arcilla)	<1,10	1,39	>1,47

Fuente: USDA (1999).

2.1.2.2. Conductividad eléctrica

Por lo general valores de conductividad eléctrica de entre 0 y 0.8 dS/m. no generan restricciones en el crecimiento de los cultivos. Interpretaciones de calidad de suelo para sitios específicos depende del uso específico del suelo y de la tolerancia de los cultivos (USDA, 1999).

La conducción de electricidad en el suelo se da a través de los poros con humedad que separan partículas individuales. Es por esto que se ha visualizado que en un suelo en el cual sus poros están a capacidad de campo y a su vez es de textura fina tiende a conducir la electricidad más fácilmente (USDA, 1999). Por lo tanto, suelos arcillosos (alta cantidad de poros saturados con agua) conducen la corriente mejor que los suelos arenosos y a su vez también se ve incrementada la conducción de la electricidad porque son más propensos a la compactación.

La conductividad eléctrica del suelo no tiene efecto directo sobre el crecimiento del cultivo o su rendimiento, sino que es una medida indirecta de propiedades que los afectan, tales como capacidad para almacenar agua, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, drenaje del suelo, nivel de materia orgánica, niveles de nutrientes, salinidad y niveles de compactación del suelo.

2.1.2.3. Porosidad y resistencia a la penetración

El espacio poroso del suelo determina en gran medida la capacidad de desarrollo radicular que pueda tener la planta. Dentro del espacio poroso se encuentran los macro y los microporos. Los macroporos no son capaces de retener el agua contra la fuerza de gravedad por lo que gracias a ello son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, y además son los encargados de brindarles el espacio físico donde se desarrollan las raíces. Con respecto a los microporos estos si retienen el agua, la cual queda disponible para satisfacer las necesidades de los cultivos (Garcia et al., 2004). La condición física de un suelo depende, en gran medida de la cantidad de poros y del tamaño de los mismos (Vásquez y Vásquez, 1984).

Como se mencionó anteriormente la compactación afecta el flujo de agua en los suelos. La misma se produce por una reubicación del espacio poroso (Horton et al., Strudley et al., citados por Soracco et al., 2009).

Radford et al., citados por Jagdish et al. (2015) determinaron los cambios que surgen en diversas propiedades del suelo inmediatamente después de la aplicación de una carga de compactación conocida (10 y 2 Mg. de carga en los ejes delantero y trasero, respectivamente) a un vertisol (con humedad) y encontraron que la compactación se veía mayormente en los primeros 20cm del suelo, pero en los primeros 10cm del suelo disminuyó la densidad de los poros (No. de poros/unidad de área) en los tres rangos de tamaños de poros (macro, meso y microporos).

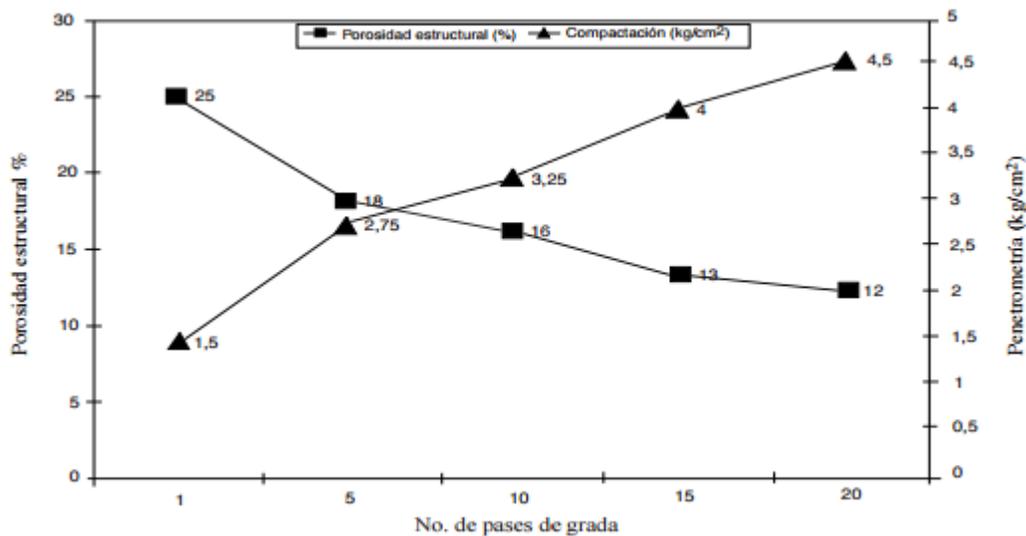


Figura No. 1. Impacto del laboreo con grada sobre la compactación y la porosidad estructural (%).

Fuente: Alfonso et al. (2000).

La resistencia que ofrece el suelo también se utiliza como una medida del grado de compactación del mismo, debido a que refleja la fuerza con que las raíces deben ejercer para el bienestar de las mismas (Taylor Mason et al., Panayiotopoulos et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

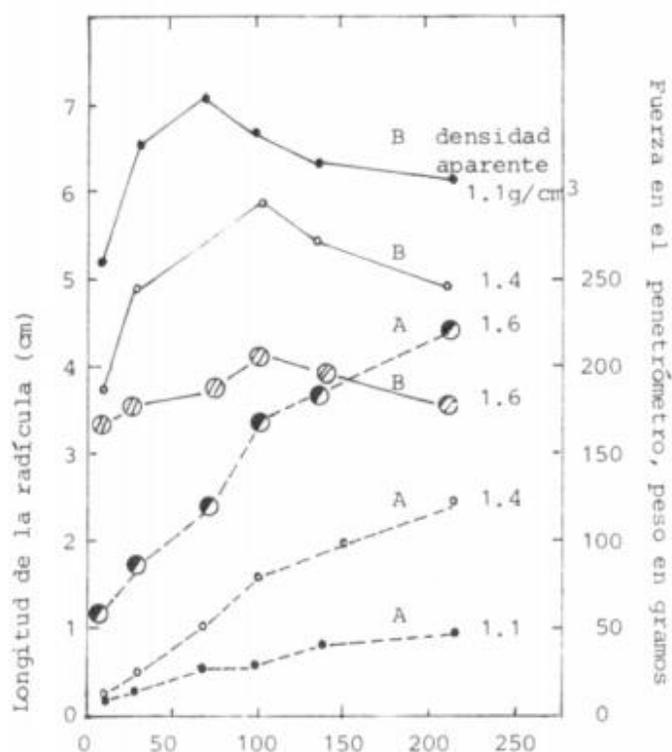


Figura No. 2. Efecto de la densidad aparente y de la tensión de humedad en la resistencia del suelo a la penetración (A) y en el alargamiento de las raíces (B).

Fuente: Eavis, citado por García et al. (2004).

En la Figura No. 2. se observa un mismo suelo, en el que por diferentes tratamientos se lo ha llevado a contenido de macroporos diferentes, evaluados por valores de densidad aparente.

En las líneas punteadas se visualiza la relación existente entre la penetrabilidad mecánica del suelo con su contenido de humedad medido a través de su potencial de matriz.

A medida que el suelo se seca, independientemente del grado de compactación del mismo, aumenta su resistencia mecánica. Las líneas enteras relacionan el crecimiento de las radículas de maíz con el contenido de humedad del suelo en cada una de las situaciones de compactación. Se visualiza que independientemente del contenido de humedad, el crecimiento radicular es menor cuando el nivel de compactación del suelo es mayor esto es resultado de una mayor resistencia mecánica.

2.1.2.4. Estructura del suelo

Investigadores del USDA (1999) definieron a la estructura del suelo como el “arreglo y la organización de las partículas en el suelo, forma que tienen los elementos para ordenarse en agregados o estructuras estáticas, condicionando el espacio entre estos que son predominantemente macroporos”.

El USDA (1999) menciona que la estructura está muy ligada a cambios en el clima, la actividad biológica, y las prácticas de manejo que se ejerzan sobre el suelo. La estabilidad de la misma tiene una gran importancia en muchos procesos del suelo y su interacción con las plantas, erosión, infiltración de agua, exploración radicular, aireación y resistencia mecánica a la penetración. Este departamento sostiene que la observación y descripción de la estructura del suelo en el campo es subjetiva y cualitativa.

En la siguiente figura, se presenta un esquema de los efectos de la compactación en la estructura de suelo. Donde en el lado izquierdo, el suelo se presenta con buena estructura, conservando el espacio poroso y propiedades naturales del mismo. Del lado derecho se perdió la estructura por compactación. El suelo pierde profundidad por compactación y erosión.

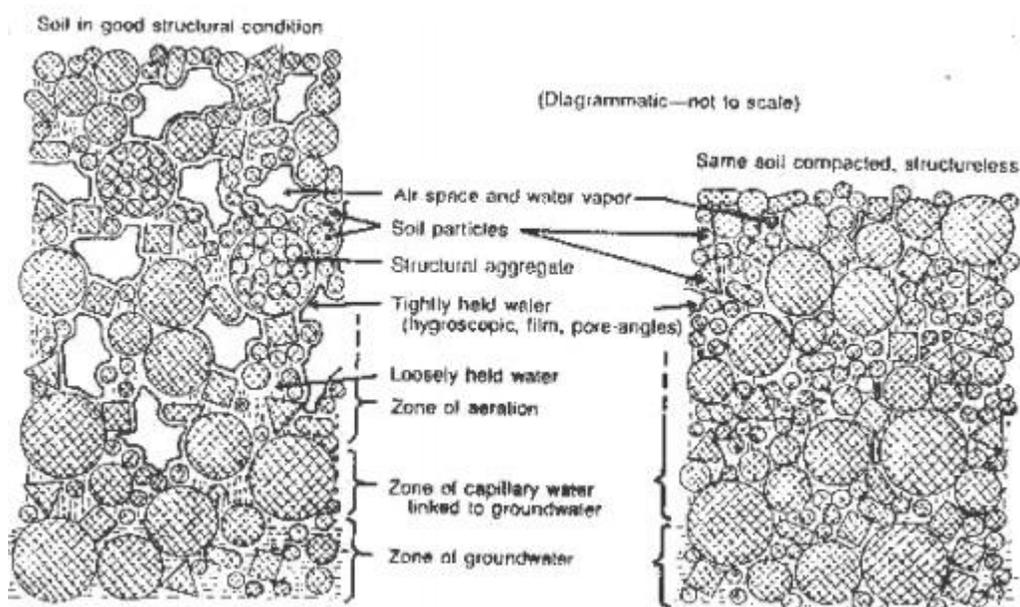


Figura No. 3. Perfiles de estructura de suelos.

Fuente: Gracen, citado por García et al. (2004).

2.1.2.5. Capacidad de infiltración

Es una propiedad hidrofísica muy importante del suelo y representa un fenómeno complejo en el cual se puede explicar tanto la infiltración y el

movimiento del agua, así como la retención en su interior (Guerrero e Israel, 2000). La velocidad con la que el agua entra en el suelo se denomina velocidad de infiltración, la que depende directamente del tipo de suelo, de la estructura del suelo, o grado de agregación y del contenido de agua en el mismo (Lowery et al., 1996). El contenido inicial de agua en el suelo, al momento de la medición, afecta la capacidad del suelo de absorber agua adicional. Es por esto que la velocidad de infiltración es mayor cuando el suelo está seco que cuando está húmedo. También la infiltración disminuye cuando el tamaño o cantidad de poros son menores por condiciones tales como el rompimiento de la estructura, contaminación de poros por partículas ajenas a ellos, o movimientos más lentos de agua ocasionados en profundidad cuando el agua llega subsuelos más densos (Donahue et al., 1997).

Inmediatamente después de la labranza convencional se nota una mejor infiltración, debido al aflojamiento de zonas compactadas. Esta acción afloja el suelo pero a su vez rompe agregados y deteriora la estructura del suelo dejando susceptible el suelo para el desarrollo de compactación, encostramiento superficial y la disminución de poros (USDA, 1999).

La velocidad por la cual el agua penetra el suelo (velocidad de infiltración) también se puede utilizar para controlar el estado de la compactación del suelo, especialmente de los primeros centímetros del perfil. El agua se infiltra más rápido en los suelos no afectados por la compactación que poseen mejor estructura (Hamza y Anderson, 2005). Se observan menores velocidades de infiltración asociado a suelos compactados con baja cantidad de espacio poroso. En los suelos que se forma compactación superficial, se produce un sello en la superficie del suelo y esto puede presentar velocidades de infiltración severamente aminoradas (USDA, 1999).

Hamza y Anderson (2005) observaron que el descompactado subsuperficial (provocado por un paraplow) provocó un aumento de la tasa de infiltración en 3 de los 4 años evaluados. Lo que concluyeron que el efecto del paraplow solo provocó aumentos de esta propiedad durante 3 años. De hecho, el efecto del subsolado en la infiltración del agua comenzó a disminuir abruptamente en el segundo año. Estos autores entienden que los espacios generados por el paraplow se llenan gradualmente con partículas finas y coloides del suelo y se vuelve a recomprimir reduciendo la tasa de infiltración. También Abo-Abda y Hussain, citados por Jagdish et al. (2015) informaron que a causa de la compactación, un suelo arenoso pasó de 42 a 13% en la tasa de infiltración.

Tisdall y Adem, citados por Jagdish et al. (2015) demuestran que la infiltración del suelo es directamente proporcional a la estabilidad de la estructura del suelo y que la compactación del suelo afecta de manera considerable la permeabilidad del mismo.

2.1.2.6. Textura del suelo

La textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo (arena gruesa, arena media, arena fina, limo, arcilla). En la medida que un suelo ofrezca soporte favoreciendo la fijación del sistema radicular de las plantas y a su vez suministre nutrientes (poder buffer) se podrá decir que tiene una buena estructura. Las fracciones gruesas (arena y grava) cuando no están cubiertas de las fracciones finas (arcilla y limo) carecen prácticamente de plasticidad y de tenacidad, por esto, es que poseen un buen drenaje y aireación y no ofrecen resistencia al laboreo. Las partículas de arcilla generalmente son laminares al igual que la mica y al humedecerse se expande, se vuelve pegajosa y quedan plásticas. En un suelo al predominar las fracciones finas (arcilla y limo) tiende a retardar el movimiento de agua y aire. Un suelo con esas condiciones será altamente plástico y fuertemente adhesivo cuando esté demasiado mojado, y será pesado y convertido en terrones al secarse, a menos que se trabaje en condiciones adecuadas. Como acaba de decirse tales suelos se llaman pesados por presentar características de difícil laboreo, en contraste con los livianos, de fácil laboreo, los llamados suelos arenosos. Sin embargo, si tienen buena estructura los suelos de textura fina pueden poseer buenas características de drenaje y aireación (García et al., 2004).

Ghildyal y Satyanarayana, citados por Jagdish et al. (2015) informaron que los suelos de textura media tienen mayor facilidad para compactarse que los ligeros y más pesados. En tanto para suelos arenosos que sufren compactación, el estrés generado por la misma se produce en dirección vertical, mientras que en el suelo arcilloso la propagación del estrés era multidireccional (Ellies Sch et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

2.1.2.7. Humedad del suelo

En el proceso de compactación se visualiza como el contenido de agua del suelo como factor más importante (Soane y Van Ouwerkerk, citados por Hamza y Anderson, 2005).

Lipiec et al., citados por Hamza y Anderson (2005) mencionan que a menor potencial hídrico del suelo la resistencia a la penetración aumenta en todos los niveles. Observando que el contenido de agua es el factor más importante. Medvedev y Cybulko, citados por Hamza y Anderson (2005) pudieron constatar que un suelo con bajos contenidos de humedad sometido a cargas máximas no se deforma más de 2 cm de profundidad, mientras que a mayor contenido de agua el valor de la carga soportable era apreciablemente menor.

En otras palabras, un mayor contenido de agua del suelo provoca una disminución en la capacidad de soportar una carga sobre el mismo (Kondo y Dias Junior, citados por Hamza y Anderson, 2005). Por lo que Bakker y Davis, citados por Hamza y Anderson (2005) dedujeron que una mayor deformación del suelo es producida con el incremento de la humedad del mismo y el número de pasadas de maquinaria pesada.

El aumento de la compactación del suelo con el aumento de la humedad del suelo es cierto hasta un determinado valor denominado contenido óptimo de humedad, que por encima del cual el aumento del contenido de humedad del suelo resulta en disminuciones en la compactación bajo una carga dada a medida que el suelo se vuelve cada vez más plástico e incompresible (Hamza y Anderson, 2005). Entonces si se comparan dos suelos con alto contenido de humedad, uno compactado (por el pasaje de maquinaria) y el otro no compactado (sin pasaje) se observa que no existen diferencias entre ambos con respecto a la resistencia que ofrece el suelo, y a su vez esta resistencia es menor que el valor que limita el crecimiento de las raíces (<2 MPa). Por lo tanto a medida que el suelo pierde humedad se hace más observable la compactación superficial del suelo (Silva et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

Contrariamente a lo citado en párrafos anteriores Tarawally et al., citados por Jagdish et al. (2015) concluyeron que los niveles más elevados de compactación del suelo fueron causados en los que el suelo se encontraba en los estados de saturación de campo y capacidad de campo.

2.2. CRECIMIENTO DEL CULTIVO EN SUELOS COMPACTADOS

2.2.1. Crecimiento radicular

El crecimiento general de las plantas depende en muy alto grado de su desarrollo radicular.

Si bien el crecimiento normal de las raíces está regulado principalmente por la macroporosidad del suelo, no es claro cuánto del efecto es solo aireación en los macroporos y cuánto es debido a la resistencia mecánica al crecimiento radicular.

Según Bennie (1996) cuando existen poros contiguos las raíces crecerán a lo largo de estos, como resultado de la baja impedancia mecánica. La profundidad del suelo, el espesor y la resistencia mecánica tienen como principal función la normal distribución de las raíces en el perfil del suelo. A ejemplo de esto las raíces que se desarrollan en suelos con restricciones están sometidas a cambios morfológicos (acortamiento, engrosamiento y formas irregulares). El acortamiento de las mismas genera menor exploración del

suelo, limitando la búsqueda de nutrientes y agua, obligando a la misma a un consumo más rápido por unidad de longitud de raíz (USDA, 1999).

Aunque también se ha constatado que los cambios diurnos de diámetro de raíz aflojan y rompen cualquier capa de suelo compactado que se localice en los alrededores de la misma (Hamza y Anderson, 2005). Estas muestran una disminución temporal de diámetro después de la transpiración seguido por un aumento temporal significativo. Esta fluctuación diurna de diámetro desestabiliza el suelo y reduce la resistencia a la penetración (Singh y Sainju, citados por Hamza y Anderson, 2005). Por lo tanto, mediante esta acción las raíces pueden superar algún tipo de resistencia a la penetración. García et al., citados por Jagdish et al. (2015) informaron que los tratamientos de compactación no afectaron significativamente el crecimiento total de las raíces, debido a que la fertilización supera estos efectos. Así mismo todos estos factores pueden ocasionar estrés en las plantas, el que eventualmente, puede causar una reducción del crecimiento y de la productividad del cultivo (USDA, 1999).

Panayiotopoulos et al., citados por Hamza y Anderson (2005) demostraron que plantas creciendo bajo condiciones controladas tanto en condiciones de alta y baja cantidad de agua en el suelo generaron mayor cantidad de raíces laterales (mayor cantidad de materia seca) que las que pudieron generar las plantas creciendo en condiciones de suelo compactado. Las raíces que crecieron en un lugar compactado generaron menor cantidad de materia verde y seca.

Las distintas especies vegetales soportan diferentes resistencias ofrecidas por el suelo. Se considera que para el cultivo de *Glycine max* (soja), cuando el suelo está a capacidad de campo la tasa de crecimiento radicular de la misma es severamente afectada cuando la resistencia a la penetración alcanza valores de 3 Mpa (Imvinkelried et al., 2011).

Por Hamza y Anderson (2005) quedó demostrado que cuando la resistencia a la penetración es de 0.52 Mpa (densidad aparente de 1.45 Mg m^3) la reducción de las raíces fue de un 10% inferior al crecimiento normal de las mismas y al aumentar la resistencia de la penetración provocaba un aumento en la disminución de las mismas llegando al punto de reducirse un 50% del tamaño original cuando la resistencia a la penetración era de 1.45 Mpa (densidad aparente de 1.69 Mg m^3).

Rosolem y Takahashi, citados por Hamza y Anderson (2005) estudiaron los efectos de la compactación del suelo subsuperficial en el crecimiento de la raíz y la absorción de nutrientes por la soja cultivadas en suelo franco arenoso. Del trabajo se dedujo que las raíces creciendo en un suelo que sufre compactación subsuperficial tenían un claro aumento en el crecimiento de las

mismas en la parte superficial, reduciéndose cuadráticamente el crecimiento en profundidad.

Mason et al., citados por Hamza y Anderson (2005) detectaron que la rasgadura del suelo provocada por herramientas como subsoladores mejoró la forma de la raíz y la extensión vertical pudiendo ser una forma de corregir el problema.

Voorhees et al., citados por Jagdish et al. (2015) estudiaron los efectos que la compactación ejercida por el tráfico de maquinaria sobre la nodulación de la soja. Después de 3 años de pasaje de maquinaria sobre el mismo lugar pudieron observar que se alteraba la distribución vertical y horizontal de los nódulos. Es por eso que informan que la compactación del suelo modifica la morfología y el funcionamiento de los sistemas radiculares de las plantas mediante una serie de mecanismos que no son solo físicos sino también biológicos y químicos. Taylor y Brar, citados por Jagdish et al. (2015) también pudieron observar que si la zona compactada es el subsuelo no afecta la longitud total o el área en el que se abastece de recursos.

En otros cultivos como lo son la canola, trigo y maíz se observó también una reducción significativa del crecimiento de la raíz creciendo bajo las huellas de las ruedas (Chan et al., Sur y Sidhu, citados por Jagdish et al., 2015).

2.3. TRATAMIENTO DE SUELOS COMPACTADOS

2.3.1. Efecto de la descompactación de suelos

La descompactación subsuperficial se ha convertido en una técnica común la cual se usa para desintegrar horizontes del subsuelo densos que limitan la percolación del agua y la penetración de las raíces (Bateman y Chanasyk, citados por Hamza y Anderson, 2005). Esta labor puede mejorar la salud del suelo y la capacidad de las plantas para resistir enfermedades (Hamza y Anderson, 2005).

2.3.1.1. Efecto de la descompactación en el cultivo

Taboada y Micucci, citados por Vallejos et al. (2014) concluyeron que el efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos depende de las condiciones climáticas que interactúan con las propiedades del suelo. Por este motivo, el efecto de la compactación sobre el cultivo es más grave en condiciones de estrés hídrico, mientras que con condiciones climáticas favorables, en muchos casos no se observan efectos perjudiciales sobre ellos.

En el sur de Australia, con precipitaciones anuales de 273mm, Sadrás et al. (2005) hallaron incrementos entre 0 y 43% en el rendimiento del trigo

debido a la descompactación. En un trabajo previo, con precipitaciones que superaron los 850mm en el ciclo del cultivo (valores por encima de los históricos para esa región) Álvarez et al. (2009) observaron mejoras en el rendimiento de maíz en el 50% de los seis sitios de la Pampa Ondulada en los que trabajaron. Por el contrario, otros autores tales como Hongwen et al. (2007) en el norte de China (con precipitaciones anuales de 450-580mm con suelos de baja materia orgánica, menor a 1%) y Ferraris, citado por Álvarez et al. (2009) en el sur de Santa Fe (Argentina), no encontraron directamente beneficios. Este último atribuyó la falta de respuesta del maíz a la descompactación a la buena condición hídrica que tuvo el año. También Abu-Hamdeh, citado por Jagdish et al. (2015) detectó que las plantas en las parcelas compactadas (siembra sin laboreo) tenían una mayor concentración de raíces cerca de la base de las plantas que en las plantas de las parcelas subsoladas.

2.3.1.2. Efecto residual de la descompactación de suelo

Un inconveniente posterior a la operación de la descompactación subsuperficial de forma mecánica, es que la condición de suelo abierto es especialmente vulnerable a la re-compactación por posteriores pasadas de maquinaria o animales de pastoreo (Spoon, citado por Hamza y Anderson, 2005). También se produce re-compactación a través de las precipitaciones repetidas, la arcilla fina y coloides a través de ciclos de secado-humedecimiento especialmente en suelos arcillosos caen por los espacios dejados por la herramienta recompactando nuevamente (Allen y Musick, Busscher et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

La descompactación mediante paratill genera cambios positivos en las propiedades edáficas (Unger, citado por Vallejos et al., 2014). Sin embargo, son contradictorios los resultados que existen en cuanto a su perdurabilidad en el tiempo y su impacto en el rendimiento de los cultivos (Álvarez et al., citados por Vallejos et al., 2014). Hall et al., citados por Hamza y Anderson (2005), informaron que el efecto del paraplow en las relaciones suelo-agua disminuye después del primer año y el aumento del rendimiento no persistió más allá del segundo año del experimento, presumiblemente debido a la re-compactación.

2.3.2. Control del tráfico de maquinarias

El tráfico controlado es un sistema que podría ayudar a mantener una zona más favorable para el crecimiento de plantas mediante la restricción de la compactación del suelo solo a los lugares donde existe pasaje de tráfico (Braunack et al., citados por Hamza y Anderson, 2005), proporcionando así un

puesto firme, vía de circulación y una zona de suelta de enraizamiento (Kayombo y Lal, citados por Hamza y Anderson, 2005).

Por otro lado el tráfico aleatorio puede compactar severamente el suelo, reducir la infiltración y aumentar el consumo de energía (Li Hongwen et al., citados por Hamza y Anderson, 2005); también aumentar la densidad aparente del suelo, disminuir la porosidad total, relación de vacíos, la porosidad de aire y la porosidad de drenaje (Seker e Isildar, citados por Hamza y Anderson, 2005).

Balbuena et al., citados por Hamza y Anderson (2005) concluyeron que 10 pasadas afectaban significativamente las propiedades del suelo de la capa superficial de 50 cm de profundidad en comparación con los tratamientos de control de 1 pasada y no-tráfico.

En el tráfico controlado las huellas de las ruedas pueden ocupar el 20% de la tierra, pero las pérdidas en esta área puede ser compensada por un mayor rendimiento en las zonas de no tráfico de maquinaria (Li Hong Wen et al., citados por Hamza y Anderson, 2005). La porosidad del suelo compactado por la rueda disminuyó en un 8%, principalmente en poros de diámetro >12 micras, el volumen de poro capilar disminuyó en un 5,8%, y la compactación del suelo aumentó desde 39 a 272% en comparación con las áreas cultivadas fuera de las vías de circulación (Raper et al., citados por Hamza y Anderson, 2005). Resultados similares fueron reportados por Wanink et al., Panayiotopoulos et al., citados por Hamza y Anderson (2005) quienes encontraron que el tráfico controlado dio lugar a un mejor crecimiento de las raíces y una menor resistencia a la penetración. Si bien en forma independiente del peso y de la superficie de contacto rueda/ suelo, el número de pasadas reiteradas en una misma senda inducen compactación subsuperficial del suelo (Botta, 2004), el horizonte del suelo que reacciona incrementando la resistencia a la penetración lo hace cada vez más superficialmente a medida que aumenta el número de pasadas (Jorajuría, citado por Draghi et al., 2004).

Alakukku et al. (2003) recomendaron que el tránsito debiera reducirse al mínimo indispensable en condiciones de elevada humedad y los vehículos debieran portar ruedas que les permitieran limitar su presión de inflado a una máxima de 50 kPa. Las consecuencias, de no lograr establecer estas soluciones, adquieren mayor relevancia, cuando las condiciones agroclimáticas resultan desfavorables.

Balbuena et al., citados por Jagdish et al. (2015) proponen las siguientes opciones de gestión para minimizar la compactación del suelo.

Limitar el tráfico a un 20-30% de la superficie de campo mediante la designación de los lugares donde circula la maquinaria: se podría ahorrar 70 - 80% de área.

Usar un límite de peso maquinaria que no afecte la compactación del suelo.

Evitar el trabajo de la tierra en condiciones de alta humedad y mejorar el drenaje del terreno: tratar de no laborear la tierra en condiciones de alta humedad, ya que en virtud de las condiciones húmedas del suelo son más propensas a la compactación debido a la reducción de la estabilidad del agregado del suelo.

Variar la profundidad de la labranza o cincelar el suelo: podría ayudar a romper la capa compactada desarrollada.

La adición de materia orgánica mejora la estabilidad de los agregados y la estructura del suelo, por lo tanto proteger el suelo contra la compactación del suelo.

2.4. HIPÓTESIS

Como hipótesis se plantea que es posible identificar situaciones en las que la compactación del suelo actúa como factor limitante del rendimiento, utilizando la resistencia a la penetración del suelo como indicador; que la labranza sub superficial resulta una alternativa válida para levantar la restricción, lo cual resulta en un incremento del rendimiento de los cultivos; que este efecto perdura en el tiempo (residualidad).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ENSAYO

3.1.1. Descripción del sitio experimental

El estudio se realizó en el establecimiento “El Atalaya”, ubicado en el noroeste del departamento de Soriano, Uruguay (33°25'33.31”S; 57°58'52.32”O), en el período comprendido entre: diciembre (2015) y junio (2016).

El clima de la zona es templado, presenta un régimen hídrico con un promedio histórico de 1130 anuales (1961-1990), la temperatura media anual es de 17,4°C¹, caracterizando un ambiente libre de heladas de 180 días.²

El potrero utilizado estuvo durante 15 años en agricultura continua sin labranza. La secuencia de cultivos en el área experimental a partir del invierno de 2015 fue cereal/soja - barbecho/soja - cereal/maíz. El presente estudio refiere al tercer cultivo de la secuencia.

El paisaje presenta un relieve levemente ondulado con pendientes que rondan los 2.5%. El suelo fue clasificado como Brunosol Subeutrico Lúvico Ar, h de acuerdo a la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Se encuentra ubicado sobre la unidad de suelo de Cuchilla Corralito (escala 1-1.000.000), formación Fray Bentos, grupo de suelos CONEAT 11.4 (MGAP. RENARE. CONEAT, 2016).

3.1.2. Tratamientos

Se evaluaron dos tratamientos: (1) descompactado (D), correspondiente a siembra directa sobre laboreo en profundidad mediante el uso del subsolador paraplow a una profundidad máxima de 0.40 metros; (2) testigo sin descompactar correspondiente a siembra directa (SD) continua. Ambos aplicados en años diferentes. Efecto directo del uso del paraplow, consiste en pasar la herramienta en julio 2015, previo a la siembra del cultivo en el que se evalúa la respuesta (soja 2015-2016) y el efecto residual que consiste en la respuesta a la descompactación realizada el año anterior al cultivo evaluado, en marzo de 2014.

¹ INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2016. Datos meteorológicos (sin publicar).

² INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2016. Datos meteorológicos (sin publicar).

3.1.3. Diseño experimental

El experimento consistió en parcelas apareada dispuestas en 3 bloques al azar en el que el tratamiento "D" se realizó en años diferentes. La unidad experimental fue de 300m de largo por 30m de ancho, de manera de abarcar la diversidad edáfica existente (Figura No. 4). Los resultados se analizaron utilizando un diseño anidado dentro de año de aplicación de los tratamientos.

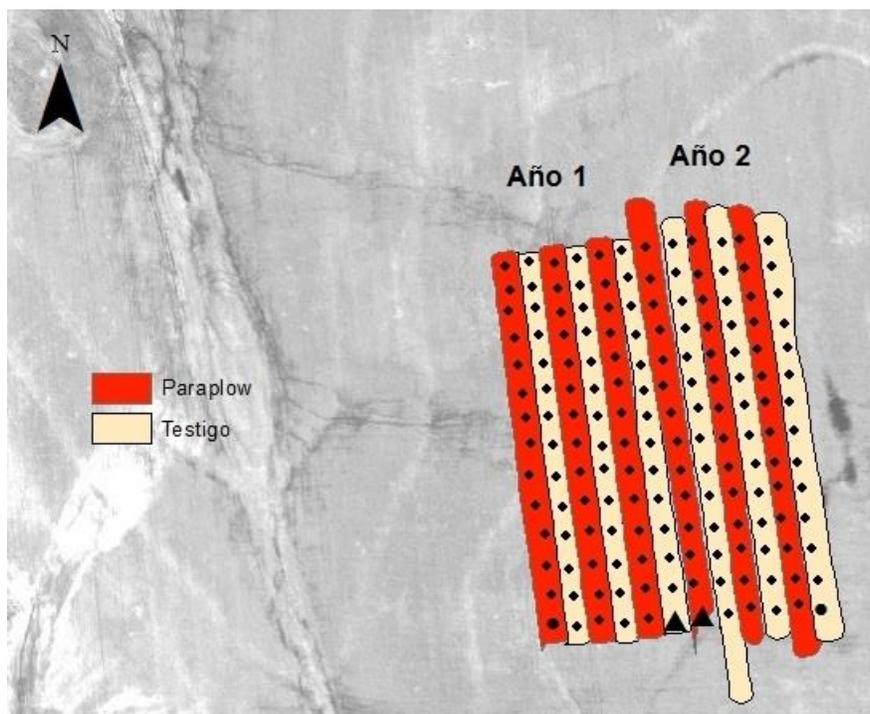


Figura No. 4. Mapa de diseño del ensayo y grilla de muestreo.

Para el estudio de las medias de los tratamientos de las diferentes variables se utilizó la prueba Tukey ($P > 0.05$ y $P > 0.10$). Los resultados de los análisis se obtuvieron utilizando el programa estadístico INFOSTAT.

3.1.4 Manejo del cultivo

Cuadro No. 2. Manejo del cultivo.

Fecha	Manejo	Detalle
18/11/2015	Barbecho	glifosato: 3 lt/ha. fluroxypyr meptil: 500 cc/ha. diclosulam: 30 grs/ha.
24/11/2015	Fertilización	0-46-0: 85 Kg/ha. KCl: 80 Kg/ha.
26/11/2015	Siembra	soja 1 ^{era} . variedad: Don Mario 6.2. distancia entre hileras: 38 cm. siembra neumática con placa.
8/1/2016	Herbicida Insecticida	glifosato: 3 lt/ha. clorantraniliprole: 30cc/ha.
20/2/2016	Insecticida Insecticida Fungicida	tiametoxam + lambdacialotrina: 300 cc/ha. clorantraniliprole: 30 cc/ha. azoxistrobin + cyproconazol: 300 cc/ha.
23/3/2016	Insecticida Insecticida	tiametoxam + lambdacialotrina: 250 cc/ha. clorpirifós: 1 lt/ha.

3.1.5. Muestreos

Los muestreos se realizaron en el centro de una grilla georeferenciada de 30 x 20m, por lo que se tomaron 2 muestras dentro de cada grilla.

3.1.5.1. Determinaciones en suelo

La conductividad eléctrica aparente ($s.s^{-1}$) se determinó el día 2/12/2015 con un conductímetro portátil a profundidades de 20 y 40cm, realizándose 28 perforaciones por faja (2 en cada punto), en las 6 fajas de cada unidad experimental.

La resistencia mecánica a la penetración ($MPa\ cm^2$) se determinó el día 2/12/2015 con un penetrómetro marca Rimik CP20, de 0 a 400mm de profundidad, para ello se realizaron 28 perforaciones por faja (2 en cada punto), en las 6 fajas de cada de cada unidad experimental. Posteriormente se calcularon valores promedio y se agruparon en 3 grupos: 0-8cm, 8-20cm y más de 20cm.

3.1.5.2. Determinaciones en el cultivo

El 15 de enero de 2016 se contabilizó el número de plantas logradas por metro lineal. Se contabilizaron cuatro metros lineales en cada punto de muestreo.

También se midió la altura de dos plantas por punto de muestreo a las que también se les estableció la fenología en la que se encontraba.

EL 1 de febrero de 2016 el cultivo se encontraba en el estadio R1.

Este mismo día también se midió altura de plantas (mismo método que se empleó el 15 de enero de 2016) y se extrajeron hojas de las mismas (20 hojas con peciolo por punto; seleccionando la más reciente y completamente desarrollada), elegidas al azar en cada uno de los 14 puntos de la faja.

A las hojas extraídas se las seco en estufa a 60°C durante 48 horas, luego se molieron para después ser llevadas a laboratorio y determinar el porcentaje de nitrógeno y potasio. El contenido de nitrógeno total se determinó con la técnica del método kjeldahl, y el contenido total de potasio se determinó mediante emisión.

El 11 de febrero de 2016, con el cultivo en R2 se cuantificó el Índice verde normalizado del cultivo con un sensor Multiespectral bandas 5-3-2-RGB-falso color compuesto montado en un dron.

Finalmente se obtuvo el rendimiento mediante dos vías; la primera realizando muestreos (84 muestras por experimento), en los cuales se realizó la cosecha manual del cultivo y midiendo los componentes del rendimiento de forma individual, se llegó al rendimiento final en cada punto evaluado. Para ello de cada muestra obtenida se separaron 10 plantas elegidas al azar, se les contabilizó el número de vainas, número de granos por vaina y peso del grano.

El resto de las plantas se trilló con una trilladora estática y se pesó. Con el peso total de la muestra que corresponde a 4 metros lineal de cada muestreo se obtuvo el rendimiento por superficie (entre otros indicadores como porcentaje de humedad y componentes del rendimiento).

El rendimiento de grano se cuantificó utilizando una cosechadora equipada con monitor de rendimiento y GPS, registrándose en una grilla de 10 x 5m. El rendimiento de grano en cada punto de muestreos se estimó utilizando la función “punto más cercano” del programa Arcgis 10.

3.1.6. Análisis estadístico de los resultados

Los resultados se analizaron utilizando dos estrategias:

1. Como bloques al azar dentro de años, utilizando los sitios georeferenciados como error de muestreo.

$$y_{ij(k)} = \mu + A_i + B_{k(A_i)} + \tau_j + Ax\tau_{ij} + \varepsilon_{ij(k)}$$

Dónde: μ = media general

A_i = efecto año

$B_{k(A_i)}$ = efecto año (bloque)

τ_j = efecto tratamiento

$Ax\tau_{ij}$ = tratamiento x año

$\varepsilon_{ij(k)}$ = error experimental "b"

El efecto año se testeó contra el Error "a" = año (bloque)

2. Se identificaron tres zonas contrastantes por la resistencia a la penetración del suelo en el estrato 8-30 cm para los tratamientos sin descompactar. Para ello se estudió la correlación espacial de la resistencia a la penetración, ajustándose un semivariograma exponencial con una relación umbral/pepita de 14,95. Para esto se utilizó el software Arcgis 10.0, interpolando la resistencia a la penetración del suelo mediante kriging ordinario. Se delinearon tres zonas homogéneas dentro de sí y diferente entre ellas. La respuesta del cultivo y de propiedades del suelo se analizó como bloques al azar con zonas como factor de clasificación, utilizando los sitios de muestreo georeferenciados como error de muestreo.

$$y_{ij(k)} = \mu + A_i + B_{k(A_i)} + \tau_j + Ax\tau_{ij} + \varepsilon_{ij(k)}$$

Dónde: μ = media general

A_i = efecto zona

$B_{k(A_i)}$ = efecto zona (bloque)

τ_j = efecto tratamiento

$Ax\tau_{ij}$ = tratamiento x zona

$\varepsilon_{ij(k)}$ = error experimental "b"

El efecto zona se testeó contra el Error "a"= zona (bloque)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Durante el ciclo del cultivo de soja se requieren aproximadamente 600mm, de los cuales la mayor parte debe ocurrir durante en el periodo crítico del cultivo (300mm).

En la Figura No. 5. se presentan las precipitaciones en el sitio experimental ubicando las etapas fenológicas del cultivo. Si bien la cantidad durante el ciclo del cultivo fue similar a la media histórica de ese lugar, se destaca principalmente el mes de abril en el cual las precipitaciones fueron muy superiores a dicha media.

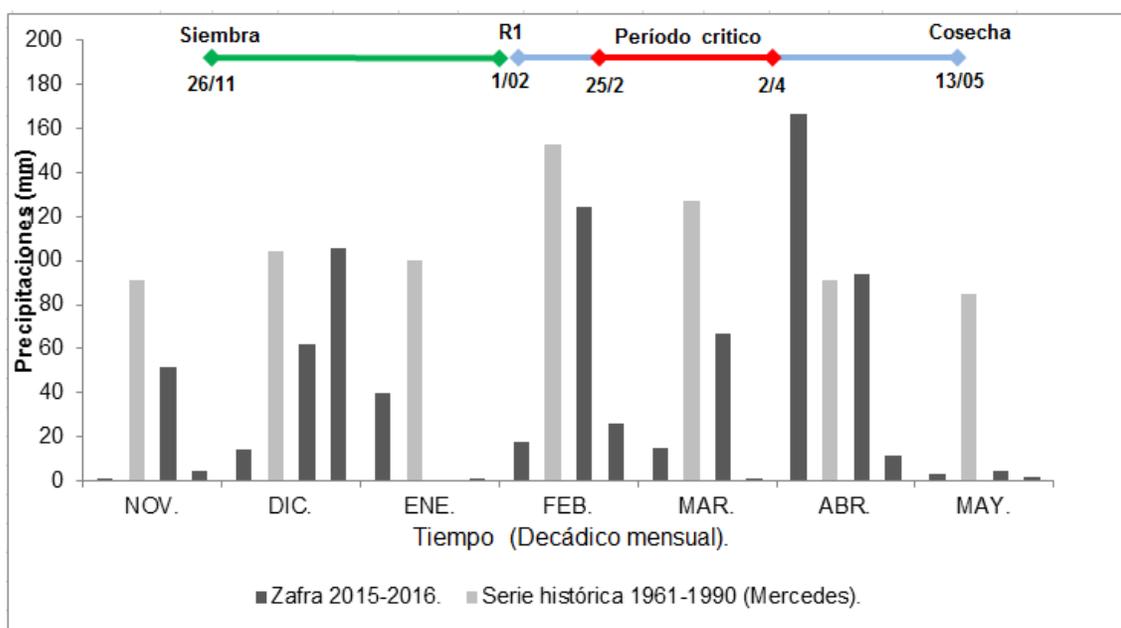


Figura No. 5. Precipitaciones decádicas entre el 11/15 y el 5/16, media histórica de precipitaciones para el mismo período y ubicación temporal de la fase veg. (Siembra a R1) y rep. (R1 a Cosecha), con su respectivo período crítico (R4-R6).

Las condiciones hídricas resultaron adecuadas para el cultivo, con unos 230mm en período vegetativo, aunque en enero donde se dan las mayores demandas atmosféricas las precipitaciones fueron escasas, inferiores a la media histórica. Posteriormente con el cultivo en el período reproductivo las precipitaciones superaron los 520mm. Durante el periodo crítico (25/2 - 2/04) llovieron aproximadamente 180mm, de los cuales 150mm fueron al comienzo de la etapa. Por lo tanto, las etapas de generación y concreción del rendimiento ocurrieron en condiciones de disponibilidad hídrica que pueden calificarse como adecuadas para un cultivo de secano.

4.2. EFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN SOBRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE Y RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO

Cuadro No. 3. Variables descriptivas del estado del suelo para los dos tratamientos (C/P vs. S/P) con efecto residual y directo (año 2014 y 2015 respectivamente).

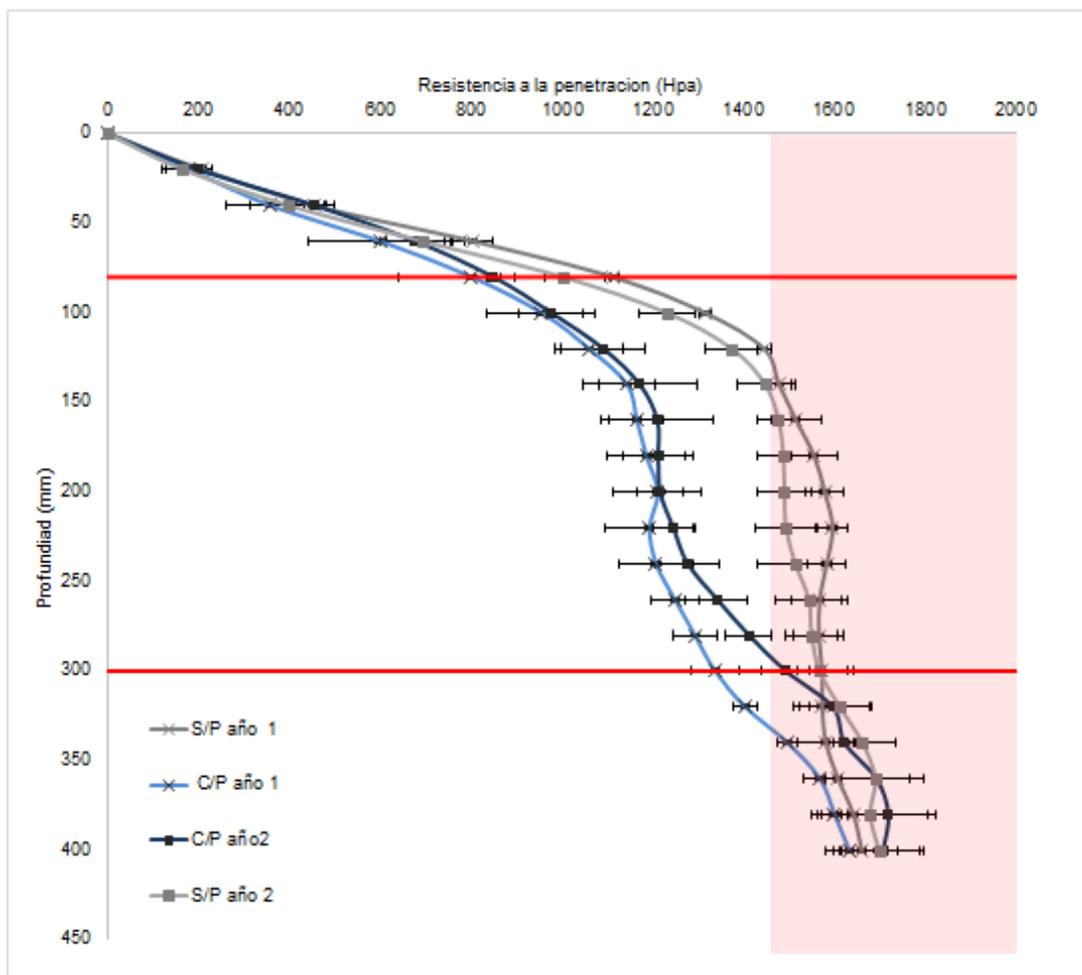
Variable	Residual		Directo	
	C/P	S/P	C/P	S/P
Conduct.(s.s ⁻¹) 20 cm	636.6a	652.7a	544.7a	595.4a
Conduct.(s.s ⁻¹)40 cm	943.6a	1002.0a	921.7a	995.1a
RP(HPa) 0-8cm	483.4a	643.6a	545.1a	564.4a
RP(HPa) 8-30cm	1181.6a	1524.5b	1240.5a	1470.2b
RP(HPa) 30-40cm	1540a	1612.6a	1667.2a	1667.8a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

La resistencia a la penetración del suelo fue reducida significativamente ($p > 0,05$) en la capa de 8 a 30cm de profundidad en el suelo, manteniéndose esta diferencia luego de un año de haber aplicado el tratamiento (efecto residual). Lo que sugiere que realizar laboreo con paraplow tiene un efecto positivo en la descompactación de suelo y que éste efecto perdura en el tiempo al menos un año.

Resultados similares fueron los obtenidos por Vallejos et al. (2014), en el cual encontró diferencias significativas en la franja de 7,5-15cm el cual se lo atribuye al efecto del subsolador, y si bien encontró diferencias en la franja de 0-7,5cm se lo atribuyó a un diferente contenido de humedad en el suelo, y no al efecto del subsolador por lo cual es factible que en nuestros resultados no se constataran diferencias en la franja 0-8cm. También Vallejos et al. (2014) afirman que el efecto del subsolador en resistencia a la penetración se

mantiene por un mínimo de 18 meses, lo que estaría respaldando los resultados de este experimento.



Barras rojas separan los estratos de profundidad (superficial, medio y profundo).

Figura No. 6. Perfil de RP medio y desvío estándar por punto para el año 1 (efecto residual) y año 2 (efecto directo) con sus respectivos tratamientos (C/P y S/P).

El tratamiento sin descompactar alcanzó niveles de RP entorno al valor crítico propuesto por Rosolem y Takahashi (1998) a partir del cual se reduce el 50% del crecimiento de las raíces de soja (1450 HPa, densidad aparente de $1,69 \text{ g.cm}^{-3}$), pero inferior a los 2000 HPa, que de alcanzarse se afectaría el 100% del crecimiento de las raíces. En tanto, el tratamiento descompactado se ubicó en el rango a partir del cual se espera una reducción de al menos 10%

(540 HPa, densidad aparente de $1,45 \text{ g.cm}^{-1}$) independientemente del año en el que se realizó el tratamiento.

4.3. EFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN SOBRE EL CULTIVO

Cuadro No. 4. Respuesta del cultivo al tratamiento de descompactación sub-superficial (C/P vs. S/P).

Variable	Residual		Directo	
	C/P	S/P	C/P	S/P
N (%)	4.5ab	4.35b	4.6a	4.47ab
K (%)	1.28a	1.23a	1.21a	1.05b
Fenología (V) 15/1/16	7.65a	7.26a	7.31a	7.24a
Altura V6-V8 (cm)	42.7b	40.03b	57.1a	40.3b
Altura R1 (cm)	53.7b	52.78b	66.2a	52.59b
NDVI	0.68a	0.68a	0.66a	0.66a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Para el porcentaje de nitrógeno en hoja no hubieron diferencias significativas entre los tratamientos, manteniendo niveles dentro del rango óptimo de nitrógeno en hoja (3.25-5.5%) para el momento analizado (comienzo de la etapa reproductiva) en todos los tratamientos.

En cuanto a los niveles de potasio hubo solamente respuesta directa a la descompactación, al no descompactar se redujo en un 0,15% los niveles de potasio en hoja, de igual manera todos los tratamientos no alcanzaron los niveles confort nutricional para la planta en comienzo de floración (1.5-2.5% medido sin pecíolo).

Con respecto a la variable altura de planta en los estadios V6-V8 y R1, se encontró efecto año por tratamiento significativo, encontrando similares resultados que Reichert et al., citados por Jagdish et al. (2015), los tratamientos descompactados el mismo año en que se siembra el cultivo (efecto directo) tienen mayores alturas de planta ($P > 0.05$).

Cuadro No. 5. Respuesta a la descompactación (C/P vs. S/P) en rendimiento de soja y sus componentes para los dos años evaluados.

Variable	Residual		Directo	
	C/P	S/P	C/P	S/P
No. de pl/m ²	25b	26ab	30a	25b
No. de vainas/pl.	26 ^a	25a	21a	24a
No. de granos/pl.	52 ^a	50a	40a	49a
No. de granos/vaina	2.1 ^a	2.1a	1.9b	2.0a
PMG(g)	197 ^a	199a	219a	209a
No. de granos/m ²	1318a	1304a	1198a	1228a
Rto. (Mg/ha)	2.40b	2.26c	2.61a	2.35bc

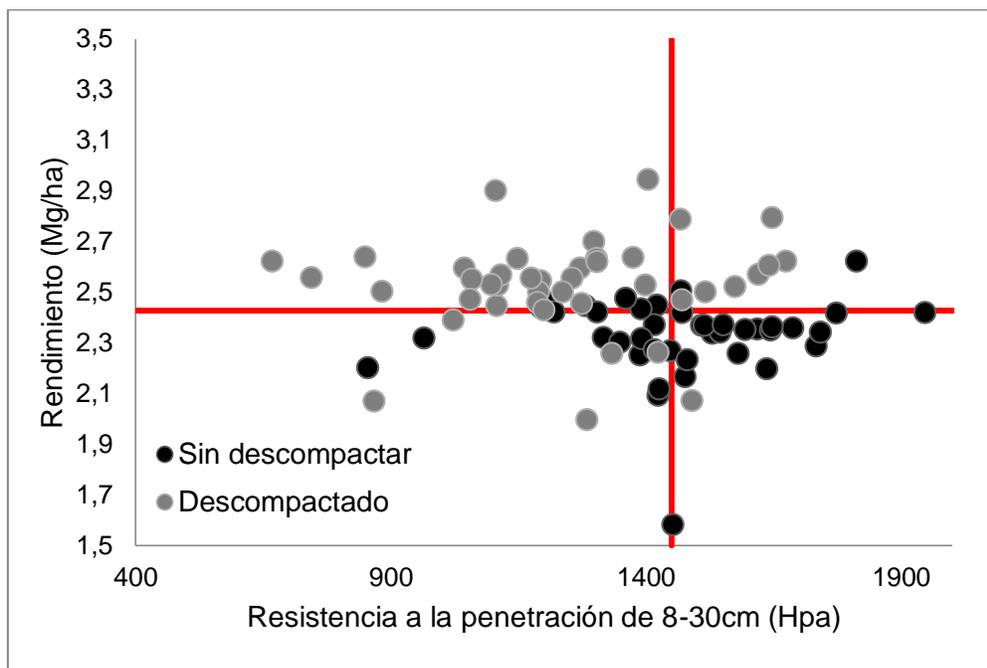
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Para las variables No. de vainas, No. de granos por planta, PMG y No. de Granos/m² no se observaron diferencias significativas tanto en los diferentes tratamientos como en los diferentes años (efecto residual vs. efecto directo).

En cambio sí se observó diferencias significativas ($p > 0,05$) en el No. de plantas/m² y No. de granos/vaina. Pasando la herramienta en el mismo año en que se siembra el cultivo (efecto directo) se obtienen mayor número de plantas/m² y menos No. de granos/vaina. Las diferencias en el número de plantas/m² está dado por el porcentaje de implantación obtenido, donde tratamientos con descompactación en efecto directo del paraplow tienen entre 15-20 plantas/10m⁻¹ más que los demás tratamientos.

Con respecto al rendimiento, hay interacción año por tratamiento, encontrándose diferencias significativas ($p > 0,05$), en el cual se aprecia que el rendimiento fue mayor cuando al cultivo se lo somete al pasaje de la herramienta el mismo año de la siembra (efecto directo), si bien obtuvo un menor número de granos/vaina esto fue compensado por un mayor número de plantas por metro cuadrado, por lo que las diferencias en rendimiento se le atribuyen al número de plantas por metro cuadrado.

Según Álvarez et al., citados por Vallejos et al. (2014) son contradictorios los resultados que existen en cuanto a la perdurabilidad de la descompactación en el tiempo y su impacto en el rendimiento de los cultivos, en este caso la perdurabilidad en el tiempo del efecto del paraplow al menos persistió de una zafra a la siguiente, no viéndose reflejado en el rendimiento.

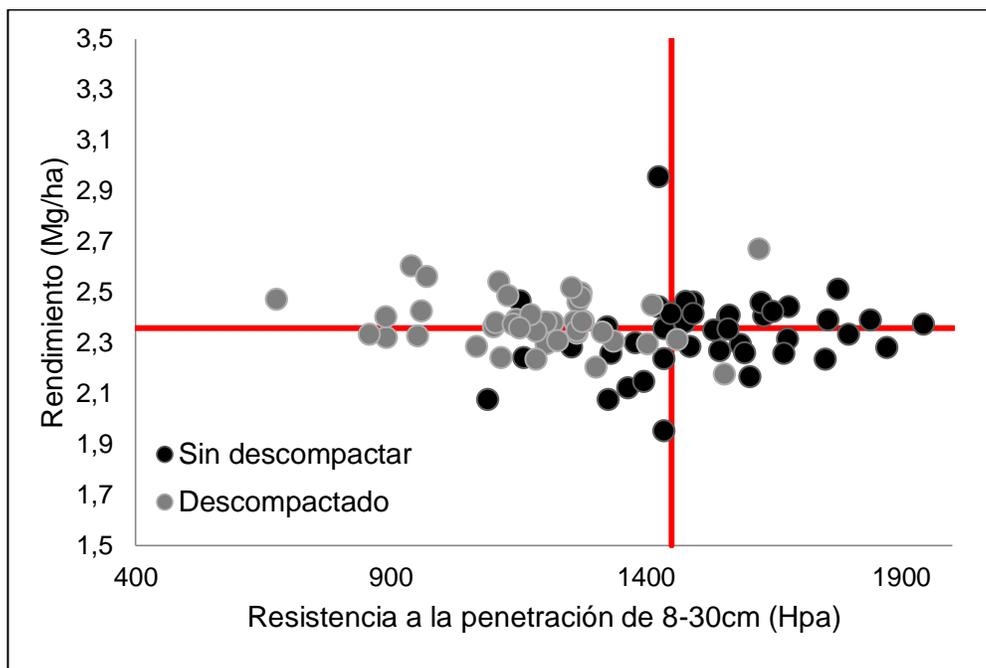


Líneas rojas dividen la figura en 4 cuadrantes, línea horizontal es el rendimiento medio del efecto directo (año 2) y la vertical es la profundidad crítica citada por la bibliografía donde se reduce en 50% el crecimiento del cultivo (1450 Hpa).

Figura No. 7. Rendimiento de soja en relación a la RP de 8-30cm para los dos tratamientos para el año 2 (efecto directo).

A partir de 1400-1450 Hpa. de resistencia a la penetración en el estrato 8-30cm de profundidad los rendimientos de soja tienden a ser menores, lo que indica una relación entre el rendimiento y la resistencia a la penetración.

También se puede ver el efecto de la descompactación en que al disminuir la resistencia a la penetración tiende a aumentar el rendimiento del cultivo, ya que la mayoría de los puntos con descompactación (grises) se ubican en el cuadrante 1, en cambio los puntos en que no se laboreó con paraplow están en el cuadrante 4, con rendimientos más bajos y una resistencia a la penetración mayor a 1450 Hpa. Correspondiéndose con la bibliografía mencionada a partir de esos niveles de resistencia a la penetración ya se vería afectado el crecimiento del cultivo y no fueron registrados valores por encima de los 2000 Hpa., a partir del cual el crecimiento se detendría por completo.



Lineas rojas dividen la figura en 4 cuadrantes, línea horizontal es el rendimiento medio del efecto residual (año 1) y la vertical es la profundidad crítica citada por la bibliografía donde se reduce en 50% el crecimiento del cultivo (1450 HPa).

Figura No. 8. Rendimiento de soja en función de la resistencia a la penetración del suelo entre 8-30cm para el año 1 (efecto residual).

Si bien los valores de la variable resistencia a la penetración perduran de forma residual, observándose una mayor cantidad de puntos grises (con paraplow) con resistencia a la penetración menor de 1450 HPa y por encima de este valor aparecen mayoritariamente los puntos sin descompactar (negros), su perdurabilidad en el tiempo en cuanto a rendimiento del cultivo se ve comprometida, ya que por encima y por debajo del promedio de rendimientos (línea roja horizontal) hay tanto puntos con descompactación como sin descompactación (grises y negros), lo que sugiere la existencia de otra variable aparte de la descompactación medida como resistencia a la penetración que explica la disminución del rendimiento desde el efecto directo (Figura No. 7) al residual (Figura No. 8) en los tratamientos con paraplow.

Estos resultados pueden estar relacionados con lo que plantearon Taboada y Micucci, citados por Vallejos et al. (2014) que el efecto de la compactación del suelo sobre el rendimiento de los cultivos depende de las condiciones climáticas que interactúan con las propiedades del suelo. Estos autores explican que el efecto de la compactación sobre el cultivo es más grave en condiciones de estrés hídrico, mientras que en condiciones climáticas

favorables como lo fue la situación de la zafra verano 2015-2016, no se observarían efectos perjudiciales sobre el cultivo.

4.4. RESPUESTA ESPACIAL A LA DESCOMPACTACIÓN

Se identificaron 3 zonas con compactación diferencial en los tratamientos testigos dentro del estrato de 8 a 30 cm. (Figura No. 9). En la zona de menor compactación la resistencia a la penetración del suelo varió entre 1100 y 1425 HPa, la zona media entre 1425 y 1570 HPa y la de alta resistencia entre 1570 y 1825 HPa.

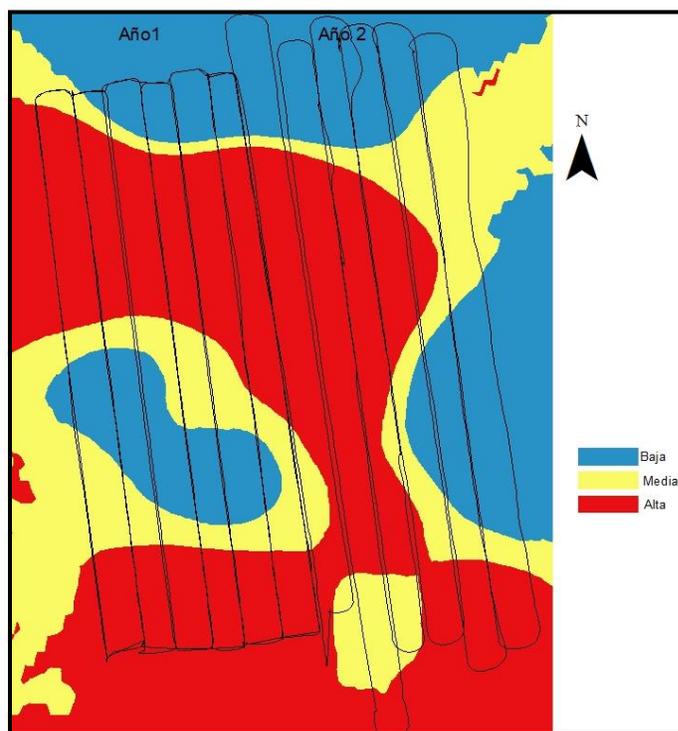
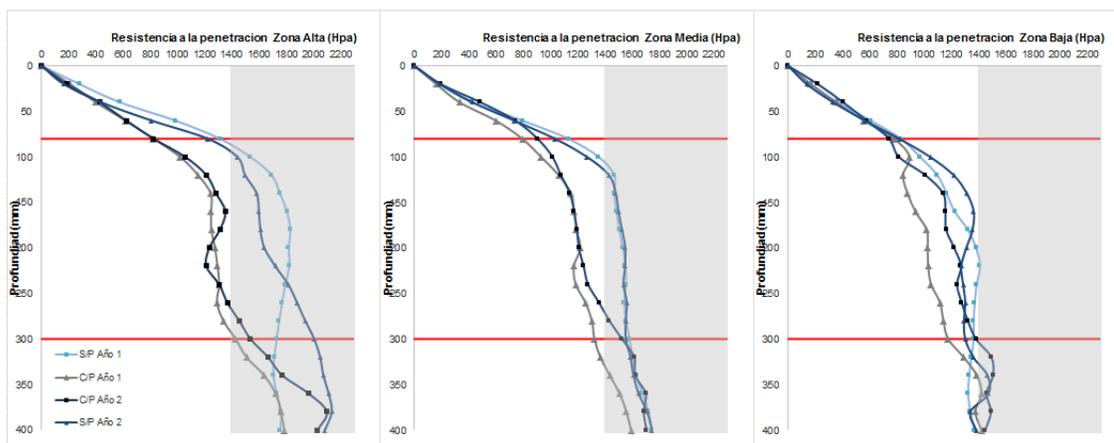


Figura No. 9. Mapa de zonificación definida por la resistencia a la penetración del suelo en el estrato 8-30cm de profundidad.

4.4.1. Efecto sobre las características físicas del suelo



Izquierda: zona alta RP, centro: zona media RP, derecha: zona baja RP.

Figura No. 10. Perfiles de resistencia a la penetración (RP) para las tres zonas.

En la Figura No. 10. se presentan los perfiles de resistencia de cada zona para los testigos (SP) y para los tratamientos descompactados (CP) en ambos años. La franja de color gris que abarca los intervalos (1400-2200 Hpa.cm²) muestra el límite donde se comenzaría a afectar el 50% del crecimiento de las raíces (lím.inf. 1450 HPa.cm²) y a los 2000 HPa.cm² ya no se esperaría crecimiento radicular (Rosolem y Takahashi, 1998).

Los perfiles de resistencia muestran claramente un diferente comportamiento al analizarlos por diferentes zonas.

Mientras que en la zona de alta Rp. las fajas de ambos años sin pasaje de la herramienta alcanzan los 1450 HPa.cm² a los 8 cm de profundidad la zona de baja compactación no supera este valor prácticamente en todo el perfil.

Por otro lado las fajas de primer y segundo año con pasaje de la herramienta, si bien se alcanza esas resistencias a la penetración (RP) que alteran de forma importante el crecimiento, lo hacen a una profundidad mayor, en la cual la masa de raíces es minoritaria (>30cm), lo que no estaría afectando de forma importante el crecimiento del cultivo.

En la zona de media RP la cual está situada en los valores de resistencia a la penetración de 1425-1572 HPa.cm² al igual que en la zona de alta RP fue muy marcado el efecto ya que gracias al pasaje de la herramienta se pudieron obtener valores por debajo de los 1450 HPa.cm².

En conclusión hay efecto de descompactación con paraplow para las tres zonas en la profundidad de 8-30 cm y éste efecto se mantiene de forma residual, homogeneizando el perfil de resistencia entre zonas.

Cuadro No. 6. Características descriptivas del suelo por zona de respuesta a la descompactación con sus respectivos tratamientos.

Variable	Alta Rp		Media Rp		Baja Rp	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Cond.20cm	587a	646a	582a	639a	607a	586a
Cond.40 cm	924a	971a	934a	995a	941a	1018a
Rp. 0-8cm	402b	559a	441ab	488ab	389b	409b
Rp. 8-30cm	1267d	1654a	1213de	1501b	1143e	1355c
Rp.30-40cm	1756ab	1848a	1616bc	1628abc	1417c	1451c

Dentro de cada variable medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Unidades: conductividad= $s.s^{-1}$, resistencia a la penetración=HPa.cm².

No existieron diferencias significativas con respecto a la conductividad eléctrica tanto para profundidades de 20cm y 40cm.

En cambio para la resistencia a la penetración (RP) si existen diferencias entre los diferentes años con sus respectivas zonas.

Observando la variable RP medida de 0-8cm se encuentran diferencias significativas entre los testigos de la zona más compactada (Alta RP) con la menos compactada (Baja RP), pero el efecto de la descompactación es significativo solo en la zona de alta RP, no encontrándose diferencias al pasar la herramienta en la zona de baja respuesta, ni en la de respuesta media.

Por otro lado, se pudo constatar que la RP en el estrato medio (8-30) existió un gran efecto tratamiento pero no existió una clara interacción zona por tratamiento. Los testigos de la zona alta y media RP están por encima del valor crítico establecido en el cual se afecta en 50% el crecimiento del cultivo pero que al ser sometida al pasaje de la herramienta baja a valores fuera del crítico. Por lo que sería importante el efecto del tratamiento para las zonas más compactadas, así mismo en la zona de baja RP si bien el testigo ya está por debajo del nivel crítico mencionado, el pasaje de la herramienta también tiene un efecto significativo disminuyendo la RP.

En el estrato de 30-40cm de profundidad si bien existen diferencias significativas entre zona de alta RP y baja RP, el efecto tratamiento dentro de cada zona no fue significativo, esto puede ser explicado ya que el efecto del paraplow no estaría llegando a esas profundidades.

Cuadro No. 7. Respuesta del cultivo a la descompactación según zona de evaluación.

Variable	Alta RP		Media RP		Baja RP	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
N (%)	4,6 ^a	4,3a	4,6a	4,4a	4,5a	4,5a
K (%)	1,2ab	1,15bc	1,2ab	1,1b	1,28a	1,15bc
Fenología ¹	7,4ab	7,2b	7,4ab	7,3b	7,7a	7,3b
Altura ²	47,9a	40,6b	53,7a	40,7b	48,4a	39,6b
Altura ³	58,4a	51,9b	62,7a	53,7b	58,8a	52,5b
NDVI	0,67abc	0,67abc	0,68a	0,68a	0,67bc	0,66c

Dentro de cada variable medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

1: se estimó en estado vegetativo el 15/1/16; 2: se midió en estadio V6-V8 (cm); 3: se midió en estadio R1 (Nt y K= % y altura=cm).

Cuadro No. 8. Componentes del rendimiento de soja (Rto. Mg ha⁻¹) por zona.

Variable	Alta RP		Media RP		Baja RP	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
No. pl./m ²	28ab	27ab	29a	26ab	27ab	25b
No. vainas/pl.	23,8a	23a	22,1a	22,7a	24,2a	27a
No. gr./planta	46,3a	46,2a	43a	48a	49,4a	54,1a
No. gr./vaina	1,97ab	2ab	1,95b	2,1a	2ab	2ab
PMG(g)	214a	202ab	211ab	213ab	198b	198b
Granos/m ²	1263a	1228a	1251a	1231a	1255a	1331a
Rto. (Mg/ha)	2,46ab	2,37bcd	2,58a	2,29cd	2,47ab	2,28d

Dentro de cada variable medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Con respecto al contenido total de nitrógeno en planta no se encontraron diferencias significativas entre ni dentro de las zonas. Pudiéndose comprobar que el pasaje de paraplow no afectó el contenido total de nitrógeno. Si se pudo apreciar el buen nivel nutritivo contenido en el cultivo, ya que se obtuvo para todas las fajas niveles dentro de los rangos de suficiencia (3.25-5.5%, Correndo y García, 2002). Si bien se extrajeron hojas incluyendo el pecíolo, lo que diluiría los valores obtenidos, estos sobrepasan ampliamente el mínimo de suficiencia.

Para el potasio no existió una clara interacción tratamiento por zona, pero tomando los valores promedios de los tratamientos en el experimento se observa que las fajas tratadas con paraplow fueron significativamente mayor ($p > 0,05$) que los testigos sin paraplow (1,25% tratamiento con paraplow vs. 1,14% testigo sin paraplow), lo que podría estar influyendo junto al grado de compactación, con los rendimientos obtenidos. Por otro lado se los valores de potasio registrados en las mediciones no alcanzaron el mínimo de suficiencia (1.5%) para el estadio fenológico en que se encontraban (R1); lo que se encontrarían en zonas de deficiencia en contenido de este nutriente; aunque dichas zonas están establecidas para muestras tomadas sin pecíolo, y las realizadas en éste experimento son con pecíolo inclusive lo que estaría diluyendo potasio del folíolo. También puede deberse a una alta tasa de crecimiento y producción de materia seca mayor a la velocidad de absorción o de transporte del alimento hacia el tejido foliar; causando su disminución (Steenjberg, 1954). Para esta variable solo existió un efecto significativo a la descompactación en la zona de baja RP no quedando claro el porqué de esa diferencia.

Para NDVI, no se encontraron diferencias significativas ni una interacción significativa entre zona por tratamiento. Para fenología la única diferencia significativa para destacar es que en la zona de baja RP hay efecto a la descompactación, sin embargo en las zonas de mayor RP este efecto no se da, lo que sugiere que puede existir un nivel crítico de RP entorno a los $1200\text{HPa}\cdot\text{cm}^2$ por debajo del cual el estado fenológico aumente. Para la variable altura de planta existió un efecto tratamiento muy marcado, que no difiere entre las diferentes zonas.

En cuanto al rendimiento no existieron diferencias entre zonas pero si un efecto tratamiento dentro de cada zona, por lo que el pasaje del paraplow tuvo efecto significativo en el rendimiento, pero no para zonas en particular; el efecto tratamiento se aprecia aún más al comparar los rendimientos promedios del experimento en donde el efecto del paraplow fue significativamente superior ($p > 0,05$) al testigo (2.5Mg/ha con paraplow vs 2.31Mg/ha testigo sin paraplow).

5. CONCLUSIONES

El laboreo subsuperficial con paraplow redujo la resistencia a la penetración del suelo entre 8 y 30cm de profundidad. Este efecto también perduró en el tiempo al menos un año después de aplicado el tratamiento.

Para la segunda hipótesis se logró aumentar el rendimiento de soja, se incrementó en respuesta a la descompactación realizada en el año de siembra, pero no se encontró una respuesta residual clara a la descompactación.

El porcentaje de potasio en hoja aparece como una variable que aparte de la descompactación en si (medido como resistencia a la penetración), esté determinando el rendimiento de soja en suelos compactados.

En relación a la hipótesis planteada, utilizando la resistencia a la penetración del suelo se logró identificar zonas homogéneas con compactación diferencial pero no se constató diferencias entre zonas en cuanto a rendimiento. La plasticidad reproductiva del cultivo podría ser la causa de este comportamiento, haciendo necesario disponer de información de distintos años y ambientes para confirmar o no lo cuantificado en este trabajo.

Frente a los resultados de este trabajo, y el cuestionamiento de la rentabilidad económica de ésta práctica de laboreo, con los costos del pasaje de paraplow (90U\$\$/ha aprox.) y un valor de 340U\$\$ la tonelada de grano de soja, laborear con paraplow todos los años en toda el área generaría 260kg/ha mas de grano que sin pasaje de la herramienta, por lo que no sería rentable económicamente (2U\$\$/ha/año de perdidas). Si se considera descompactar cada 2 años, para el efecto directo se obtendría los 260kg/ha de grano extra, más un adicional de 140kg/ha de grano en el segundo cultivo un año después como efecto residual ante un único pasaje de paraplow (90U\$\$/ha), generando cada 2 años una ganancia extra de 46U\$\$/ha (136U\$\$ por rendimientos extras sumado el efecto directo y residual, menos costo de pasaje de la herramienta), por lo tanto 23U\$\$/ha/año sería el beneficio de utilizar paraplow en toda el área a sembrar, una vez cada dos años, además de contar con un posible beneficio extra en el cultivo de invierno en caso de que lo hubiese.

6. RESUMEN

Como resultado de la intensificación de la agricultura se han generado problemas de compactación de suelos, debido a la disminución en el contenido del carbono de los mismos, aumento de la erosión y del tráfico de maquinaria pesada, con un consecuente efecto negativo en el rendimiento de los cultivos. Por ello el uso de subsoladores para descompactar el suelo y mejorar los rendimientos de los cultivos parece una opción a considerar. Este trabajo evaluó el efecto del subsolador tipo paraplow en la descompactación del suelo, como también el efecto sobre el cultivo y su perdurabilidad en el tiempo. Hubo un efecto positivo en la descompactación del suelo reduciendo la resistencia a la penetración en el estrato de 8 a 30 centímetros de profundidad, que además perduró en el tiempo por al menos 15 meses. El cultivo mostró un mayor rendimiento explicado principalmente por un aumento en el número de plantas por metro cuadrado, pero esta respuesta no se mantuvo en el tiempo; para el siguiente cultivo de soja, si bien variables como altura de planta siguieron mostrando diferencias por el efecto residual del paraplow, los rendimientos no lograron mantenerse. Por lo que aparece el potasio como una variable que podría estar explicando la caída del rendimiento al segundo año del pasaje de del paraplow. Por otra parte se logró identificar zonas con respuesta diferencial a la descompactación encontrando diferentes niveles de resistencia a la penetración, pero que no se lograron relacionar con la respuesta en el cultivo. Zonas más compactadas no arrojaron rendimientos menores que las menos compactadas.

Palabras clave: Compactación; Paraplow; Soja.

7. SUMMARY

As a result of the intensification of agriculture, soil compaction problems have been generated, due to the decrease in soil carbon content, erosion and heavy machinery traffic, with a consequent negative effect on soil yield. The crops. Therefore the use of subsoiling to unpack the soil and improve yields of crops seems an option to consider. This work evaluated the effect of the paraplow subsoil on the decomposition of the soil, as well as the effect on the crop and its durability over time. There was a positive effect on the decomposition of the soil reducing the resistance to penetration in the layer of 8 to 30 centimeters deep, which also lasted for at least 15 months. The crop showed a higher yield explained mainly by an increase in the number of plants per square meter, but this response was not maintained in the time; For the next soybean crop, although variables such as plant height continued to show differences due to the residual effect of the paraplow, the yields could not be maintained. So potassium appears as a variable that could be explaining the fall in yield to the second year of the passage of the paraplow. On the other hand, it was possible to identify zones with differential response to the decompression finding different levels of resistance to penetration, but that were not able to relate to the response in the culture. More compacted areas did not yield lower yields than the less compacted ones.

Keywords: Compaction; Paraplow; Soybeans.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alakukku, L.; Weisskopf, P.; Chamen, W. C. T.; Tijink, F. G. J.; Van Der Linden, J. P.; Pires, S.; Sommer, C.; Spoor, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction; a review. Part. 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*. 73: 145-160.
2. Alfonso, A.; Hernández, S.; Monedero, M.; Sánchez, L.; Somoza, V. 2000. Efecto de la compactación del suelo en la producción de frijol. *Agronomía Mesoamericana*. 11(1): 53-57.
3. Álvarez, C.; Torres, M.; Chamorro, E. R.; D'ambrosio, D.; Miguel, A.; Taboada, M. Á. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa; efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27(2): 159-169.
4. Arshad, M. A.; Lowery B.; Grossman, B. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J. W.; Jones, A. J. eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 123-142 (SSSA Special publication no. 49).
5. Bennie, A. T. P. 1996. Growth and mechanical impedance. In: Waisel, Y.; Esthel, A.; Kafkafi, U. eds. *Plant roots; the hidden half*. 2nd. ed. New York, Mercel Dekker. pp. 453-470.
6. Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R. H.; Rosatto, H. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities; effect of soybean (*Glycine max* (L.) Merrick). *Soil and Tillage Research*. 78: 53-58.
7. Correndo, A. A.; García, F. O. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico; cultivos extensivos. IPNI ConoSur. no. 14: s.p.
8. Donahue, R. L.; Miller, R. W.; Shickluna, J. C. 1997. *Soils; an introduction to soil and plant growth*. 2nd. ed. Englewood, New Jersey, Prentice Hall. 140 p.

9. Draghi, 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. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 9(1): 120-124.
10. García, F.; Hill, M.; Kaplán, A.; Ponce de León, J.; Rucks, L. 2004. Propiedades físicas del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 68 p.
11. Guerrero, B.; Israel, C. 2000. Manejo de la nutrición de las plantas en agroecosistemas. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina. s.p.
12. Hamza, M. A.; Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 82: 139-140.
13. Hongwen, L.; Huanwen, G.; Jin, H.; Kuhn, N. J.; McHugh, A.D.; Wenying, L.; Xiaoyan, W. 2007. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*. 94(2): 493-502.
14. Imvinkelried, H.; Dellaferrera, I.; Imbert, S.; Imhoff, S.; Hermann, O. 2011. Efecto de la compactación y la fertilización sobre los componentes del rendimiento y la eficiencia de interceptación de la radiación en el cultivo de soja. (en línea). *In: Congreso de la Soja del Mercosur (5o., 2011, Rosario). Trabajos presentados. Rosario, Santa Fé, AR, ACSOJA. p. irr. Consultado 8 ene. 2017. Disponible en http://www.acsoja.org.ar/images/cms/contenidos/29_b.pdf*
15. Jagdish, S.; Amit, S.; Amit, K. 2015. Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth; a review. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*. 5 (1): 23-32.
16. Lowery, B.; Arshad, M. A.; Lal, R.; Hickey, W. J. 1996. Soil water parameters and soil quality. *In: Doran, J. W.; Jones, A. J. eds. Methods for assessing soil quality. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 143-157 (SSSA Special publication no. 49).*

17. MGAP. DIRENARE (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Recursos Naturales Renovables, UY). 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 10 jul. 2016. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat>
18. Rosolem, C. A.; Takahashi, M. 1998. Soil compaction and soybean root growth. *Developments in Plant and Soil Sciences*. 82: 295-304.
19. Sadras, V. O.; O'leary, G. J.; Roget, D. K. 2005. Crop responses to compacted soil; capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91 (2-3): 131-148.
20. Soracco, G.; Filgueira, R.; Sarli, G.; Fournier, L.; Gelati, P.; Hilbert, J. 2009. Persistencia del efecto del subsolado sobre el movimiento del agua en el suelo en siembra directa. Uso de dos modelos teóricos. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27(1): s.p.
21. Steenbjerg, F. 1954. Weathering of minerals as indicated by plants. *Soil Science*. 5: 205-213.
22. USDA (United States Department of Agriculture, US). 1999. Soil quality test kit guide. Washington, D.C. 79 p.
23. Vallejos, A.; Kees, M.; Bondia, P.; Echeverría, N.; Silenzi, J.; Zajac, C.; De Lucia, M. 2014. Subsólado en siembra directa; efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia del Suelo*. 32(2): 291-300.
24. Vásquez, A.; Vásquez, I. 1984. Principios básicos del riego. Lima, UNALM. Facultad de Ingeniería Agrícola. 263 p.