

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

MAPEANDO LA RESPUESTA DE SOJA A LA DESCOMPACTACIÓN
SUB-SUPERFICIAL DEL SUELO

por

Federico ERNST
Pablo RIVOIR

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2016

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

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

Ing. Agr. (Dra.) Mónica Cadenazzi

Ing Agr. (PhD.) José Terra

Fecha: 3 de junio 2016

Autores:

Federico Ernst Godoy

Pablo Andrés Rivoir Piaggio

AGRADECIMIENTOS

A familia, amigos y todos los que colaboraron en este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELO	4
2.1.1. <u>Operaciones mecánicas</u>	4
2.1.2. <u>Contenido de humedad del suelo</u>	5
2.2. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO	6
2.2.1. <u>Resistencia a la penetración</u>	6
2.2.2. <u>Permeabilidad o infiltración</u>	7
2.2.3. <u>Porosidad y conductividad hidráulica</u>	7
2.2.4. <u>Humedad</u>	8
2.2.5. <u>Estructura y textura del suelo</u>	9
2.2.6. <u>Densidad aparente</u>	9
2.3. EFECTOS EN EL CRECIMIENTO VEGETAL	10
2.4. MÉTODOS PARA MEDIR COMPACTACIÓN	12
2.5. FORMAS DE CORREGIR EL PROBLEMA Y SU IMPACTO	13
2.5.1. <u>Respuesta a la descompactación sub-superficial</u>	14
2.5.1.1. Respuesta en rendimiento.....	14
2.5.1.2. Relación entre la respuesta a la descompactación subsuperficial y la condición hídrica del suelo	16

2.5.1.3.	Efecto residual de la descompactación subsuperficial	17
2.5.2.	<u>Raíces de las plantas</u>	18
2.5.3.	<u>Adicción de materia orgánica</u>	19
2.5.4.	<u>Control del pastoreo</u>	19
2.5.5.	<u>Control del tráfico</u>	20
2.6.	HERRAMIENTAS GEOESTADÍSTICAS COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN.....	21
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	23
3.1.	CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ENSAYO.....	23
3.1.1.	<u>Descripción del sitio experimental</u>	23
3.1.2.	<u>Tratamientos y diseño experimental</u>	25
3.1.3.	<u>Manejo del cultivo</u>	26
3.1.4.	<u>Determinaciones</u>	27
3.1.4.1.	En el suelo.....	27
3.1.4.2.	En el cultivo	28
3.1.5.	<u>Análisis estadístico de resultados</u>	29
3.1.5.4.	Respuesta vegetal a la descompactación del suelo por zona	31
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	32
4.1.	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	32
4.2.	DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA	33
4.2.1.	<u>Descripción estadística general</u>	33
4.2.2.	<u>Efecto promedio de la descompactación sobre la resistencia a la penetración del suelo y la respuesta vegetal</u>	36
4.2.3.	<u>Respuesta espacial a la descompactación</u>	42
4.2.3.1.	Variables de suelo.....	42

4.2.3.2. Respuesta vegetal.....	44
4.2.4. <u>Relación entre rendimiento de grano y resistencia penetración del suelo</u>	
4.2.5. <u>Comportamiento del suelo y del cultivo según zonas diferenciadas por compactación entre 8-20 cm de profundidad.</u>	45
5. <u>CONCLUSIONES</u>	57
6. <u>RESUMEN</u>	598
7. <u>SUMMARY</u>	609
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	6160
9. <u>ANEXOS</u>	665

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Manejo del cultivo.	26
2. Caracterización de las zonas definidas dentro del área experimental.	30
3. Indicadores de localización y dispersión para las variables de respuesta.	33
4. Variables medidas en planta para los dos tratamientos (c/p vs. s/p).	39
5. Variables de rendimiento para los dos tratamientos (c/p vs. s/p).	40
6. Variables descriptivas de nutrientes en planta (%) para los dos tratamientos (c/p vs. s/p).....	42
7. Variables en suelo, por zona de respuesta.	52
8. Variables en planta, por zona de respuesta.	52
9. Propiedades químicas en suelo a 7,5 y 15 cm de profundidad por zonas.	54
10. Nutrientes en planta por zonas.	54
11. Rendimiento en grano por zonas.	55
Figura No.	
1. Mapa con perfiles de suelos representativos y grilla de muestreo.	24
2. Mapas de diseño del ensayo (A) y elevación del terreno (B).	26
3. Precipitaciones decádicas acumuladas entre octubre 2014 y abril 2015 incluidos, media histórica de precipitaciones para los mismo períodos y ubicación temporal de las fase vegetativa (siembra a R1) y reproductiva (R1- cosecha) del	

cultivo de soja. La línea roja marca período crítico de definición del rendimiento en grano (entre R4-R6).....	32
4 Profundidad (cm) a la cual se alcanzó una resistencia a la penetración superior a los 2 MPa/cm ² . Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).....	37
5. Perfil de resistencia a la penetración promedio para los tratamientos descompactado y sin descompactar. Barras rojas separa los tres estratos de profundidad (superficial, medio y profundo).....	38
6. Gráfico Box-Plot de rendimiento para los tratamientos con paraplow (C/P) y sin paraplow (S/P).....	41
7. Mapas variables en suelo resistencia de 0-8 (A), de 8-20 (B), de 20-40 (C) y conductividad eléctrica (D).....	43
8. Mapas de variables en planta temperatura en planta (A) y NDVI (B).	45
9. Mapa de rendimiento (kg/ha) corregido a humedad, promedio de cada punto de muestreo.	46
10. Relación entre rendimiento y profundidad crítica de resistencia a la penetración hasta los 2000 HPa., medida con penetrómetro para suelo húmedo (izquierda) y seco (derecha), de cada punto de muestreo para los tratamientos con y sin paraplow. Las líneas rojas punteadas dividen los gráficos en 4 cuadrantes, la línea horizontal es el rendimiento promedio de la chacra (4000 kg/ha) y la vertical la profundidad crítica promedio	44
11. Rendimiento en relación a la resistencia a la penetración de 8-20 cm para los tratamientos con y sin paraplow. Las líneas rojas punteadas dividen los gráficos en 4 cuadrantes, la línea horizontal es el rendimiento promedio de la chacra (4000 kg/ha) y la vertical la profundidad crítica citada por la bibliografía donde se reduce en 50% el crecimiento del cultivo (1450 HPa.).....	48
12. Mapa de zonificación.	49

13. Perfiles de resistencia a la penetración para las tres zonas.	50
14. Diagrama de dispersión de puntos para rendimiento vs resistencia para las 3 zonas	56

1. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo pasado, la agricultura en el Uruguay ha atravesado por diferentes modelos de producción, incrementando la aplicación de tecnología, variando en la aplicación de insumos, superficie ocupada, asociación con otros rubros y tipo de productores involucrados. A partir del año 2002 se inició un proceso de intensificación agrícola, dominado por el cultivo de soja, que se tradujo en sistemas de agricultura continua de baja productividad, alto riesgo de erosión, pérdida de carbono del suelo y presumiblemente, problemas de compactación del suelo asociados a estos cambios.

La intensificación de la agricultura, definida como años de agricultura continua pos pastura, junto con el incremento de las operaciones mecánicas dentro de la chacra y el uso de maquinaria de mayor tamaño y peso son causas de la compactación del suelo generada por el propio sistema de producción, afectando las propiedades físicas del suelo, el crecimiento de las plantas y raíces; y por tanto el rendimiento de los cultivos.

En sistemas de agricultura continua sin laboreo se generan zonas de la chacra con suelo compactado por distintos mecanismos (pérdida de estructura, pérdida de carbono orgánico, tráfico de maquinaria).

Levantar esta restricción física en toda la chacra no es necesario, ya que en general no toda el área presenta problemas de compactación y sería incluso muy costoso y perjudicial para el ambiente. Determinar las zonas específicas donde es necesario descompactar, determinaría mayores rendimientos a menores costos, aumentando la eficiencia de la técnica de descompactación.

Se plantea como hipótesis que es posible identificar a priori estas zonas con respuesta diferencial a la descompactación utilizando un penetrómetro y que la respuesta vegetal puede ser cuantificada a través del mapeo del rendimiento del cultivo utilizando una cosechadora equipadas con monitor de rendimiento superpuesto al mapa de resistencia a la penetración.

Los objetivos específicos son: identificar valores críticos de resistencia a la penetración a partir de los cuales se justificaría el pasaje de la herramienta de descompactación.

Relacionar la respuesta vegetal diferencial en crecimiento y rendimiento con el cambio de las propiedades físico-químicas generadas por la descompactación del suelo.

Para ello se analizará el efecto en el suelo y la respuesta del cultivo de soja, tanto en crecimiento como en rendimiento al pasaje de una herramienta de descompactación sub superficial (paraplow) en una chacra comercial con más de 15 años de agricultura continua sin laboreo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como consecuencia de los sucesivos años de agricultura continua, el pasaje de maquinaria agrícola y la relativamente baja producción de biomasa por año se produce un proceso de degradación del suelo, el cual involucra aspectos físicos y químicos. Manteniendo el esquema de producción, dicho proceso es revertido parcialmente con el incremento en el uso de insumos (fertilización, herramientas de des-compactación, etc.).

La degradación del suelo es definida como la pérdida a largo plazo en la función y productividad de los ecosistemas, causada por alteraciones, a partir de las cuales el suelo no puede recuperarse sin ayuda (Bai et al., 2008).

La compactación de los suelos es una de las consecuencias más importante de la degradación de los suelos. Esta está dada básicamente por el tráfico de maquinaria, la cual tiene un carácter acumulativo, relacionado a la presión que ejercen sobre el suelo las maquinas, carga sobre los propulsores, presión de inflado, velocidad de desplazamiento y patinaje.

Durante la aplicación de cargas las partículas del suelo son reorganizadas, decrece el espacio poroso y estas son llevadas a un contacto más cercano, incrementando la densidad de volumen; cambia la forma, tamaño y distribución de los poros, lo cual limita la capacidad de retención del suelo, el intercambio hídrico y gaseoso, y aumenta la impedancia mecánica. Esto provoca en la planta, disminución del crecimiento de la raíz y las posibilidades de obtención de nutrientes, agua y aire (Johnson y Bailey, 2002).

En estos casos la compactación del suelo es la compresión del suelo por una fuerza externa, la cual producen un incremento en la resistencia del suelo, cambios en la estructura, menor volumen del espacio poroso, incremento en la densidad, reducción de la conductividad hidráulica y pérdida de fertilidad a través de la reducción en el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes. Esto provoca mayores requerimientos de fertilizante incrementando así los costos de producción (Elissondo et al. 2001, Hamza y Anderson 2005, Jagdish et al. 2015).

2.1. CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELO

2.1.1. Operaciones mecánicas

La principal causa de compactación es el producido por el sucesivo pasaje de maquinaria (Flowers y Lal, 1998).

La influencia de las máquinas agrícolas en la compactación se expresa a través de la acción de: presión sobre el suelo, peso sobre los sistemas de rodaje, número de pasadas, velocidad de desplazamiento y patinaje; los cuales actúan sobre las condiciones prevalecientes en el terreno (Hakansson 1988, Keller et al. 2004, Hamza y Anderson 2005).

El efecto que produce el pasaje de la rueda sobre la superficie tiene como principal consecuencia una menor porosidad del suelo (Hamza y Anderson, 2005). Los macroporos son los afectados en este proceso (Jagdish et al., 2015).

La operación de cosecha es el momento donde se produce el mayor efecto de compactación, siendo más grave cuando el suelo se encuentra húmedo dado que, en Uruguay, la siembra también se realiza en condiciones de suelo húmedo (Fernández et al., 2015).

En sistemas de siembra directa se produce compactación superficial y sub-superficial (Hamza y Anderson, 2005). La primera es debido a la presión ejercida por el sucesivo pasaje de la rueda y la consolidación de partículas, mientras que la segunda se debe al peso de la maquinaria sobre el suelo (Botta et al. 2004, Hamza y Anderson 2005, Álvarez et al. 2014). La profundidad de dicha compactación varía entre 10 y 60 cm, pero es más evidente en las capas más superficiales (Flowers y Lal, 1998).

La aleatorización del tráfico produce severa compactación del suelo, reduce la infiltración e incrementa la energía consumida (Li Hong Wen et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

Prácticamente todos los modelos de tractores y maquinarias generan presiones por sobre los límites recomendados para no producir compactación (Hetz, citado por Hamza y Anderson, 2005).

El 30% del área es transitada por los neumáticos de maquinaria pesada en un sistema de cero laboreo con una pasada a la siembra, mientras que en mínimo laboreo que conlleva de 2 a 3 pasadas, llega al 60% y en laboreo convencional el 100%, en un ciclo de cultivo (Jagdish et al., 2015).

La primer pasada de la rueda es la que causa la mayor porción de la compactación total (Bakker y Davis, 1995), y la máxima compactación ocurre en las primeras tres pasadas de una rueda cargada (Abebe et al., citados por Jagdish et al., 2015).

La compactación sub-superficial es inducida por repetidas pasadas y persiste por mucho tiempo (Balbuena et al., 2000).

2.1.2. Contenido de humedad del suelo

Uno de los factores dominantes que afectan el nivel de compactación es el contenido de humedad del suelo, el que a su vez, aumenta con cambios en el nivel de compactación (Jagdish et al., 2015).

A mayor contenido de humedad del suelo, la susceptibilidad del suelo a sufrir compactación es mayor (Lipiec et al., citados por Hamza y Anderson, 2005). Por lo tanto la deformación del suelo se incrementa a mayor contenido de humedad y a mayor número de pasadas de maquinaria (Bakker y Davis, 1995). Los mayores niveles de compactación de suelo son causados por el estado del suelo saturado o a capacidad de campo (Jagdish et al., 2015).

A alto contenido de humedad, la diferencia en resistencia del suelo entre suelo compactado (con tráfico) y suelo sin compactar (sin tráfico) es menor y usualmente menor que el valor límite para el crecimiento de las raíces (mayor a 2 MPa). Sin embargo cuando el suelo se seca la compactación en la capa superficial se vuelve apreciable (Botta et al. 2004, Sanzano et al. 2012, Silva et al., citados por Jagdish et al. 2015).

Cuando el suelo se encuentra seco, la profundidad afectada por el pasaje de maquinaria es de 2cm aproximadamente, mientras que a mayor contenido de humedad en el suelo, el límite de carga permisible baja considerablemente (Medvedev y Cybulko, 1995).

2.2. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

El laboreo y el tránsito de maquinaria perjudican la condición física del suelo, provocando compresión y compactación del mismo (Elissondo et al. 2001, Álvarez 2012, Tour et al. 2014).

La compactación afecta a propiedades de los suelos como porosidad, densidad aparente, impedancia mecánica, conductividad hidráulica, agua disponible para las plantas y tiene el potencial de alterar dramáticamente la morfología vegetal y fisiología (Bingham, 2001) y de reducir el crecimiento del cultivo y producción (Elissondo et al. 2001, Sadras et al. 2005).

El carbono orgánico del suelo (COS) actúa disipando la energía de compactación provocada por el tránsito, actuando por lo tanto como amortiguador en el suelo. En un trabajo realizado por Álvarez (2012), concluye que el valor de COS fue la variable que mejor predijo el valor de DMAX (densidad aparente máxima alcanzada en el contenido hídrico crítico), siendo la textura la segunda variable que mejor explica el valor de DMAX.

Las propiedades físicas del suelo mejoran durante el crecimiento de los cultivos de soja y maíz, empeorando nuevamente durante la cosecha (Fernández et al., 2015).

2.2.1. Resistencia a la penetración

En suelos compactados bajo SD se observa un importante aumento en la resistencia a la penetración (Álvarez et al., 2009).

La resistencia a la penetración resulta de la interacción de varios factores o propiedades del suelo como densidad aparente, contenido de agua, textura, estructura y mineralogía de la arcilla, etc. (Jagdish et al., 2015). El contenido de agua en el suelo esta significativamente e inversamente relacionada a la resistencia a la penetración (Sadras et al. 2005, Zhang et al., citados por Jagdish et al. 2015).

2.2.2. Permeabilidad o infiltración

La infiltración del suelo es directamente proporcional a la estabilidad de la estructura (Tisdall y Adem, citados por Hamza y Anderson, 2005), medida de los poros, volumen y estructura (Patel y Singh, citados por Hamza y Anderson, 2005).

La infiltración se reduce linealmente con el incremento del número de pasadas de un tractor de 5 Mg de peso (Ohu et al., citados por Jagdish et al., 2015).

Ankeny et al., citados por Jagdish et al. (2015) encontraron que el tráfico de la rueda reduce la tasa ponderada de infiltración, pero el impacto varía con el tipo de suelo.

Agrawal, citado por Jagdish et al. (2015) atribuye la reducción en infiltración y percolación, en pérdida de agua y nutrientes debido a la reducción en la transmisión del agua por los poros.

2.2.3. Porosidad y conductividad hidráulica

La porosidad total disminuye y el aire poroso, debido a los poros se reduce significativamente debido a la compactación (Ishaq et al., citados por Jagdish et al., 2015).

El efecto negativo de la compactación en las propiedades físicas e hídricas (hidro-físicas), denotan un incremento de los poros con volumen menor a 0,5 μm en detrimento de las fracciones de volumen de poro de 50-0,5 y mayores a 50 μm , siguiendo la misma tendencia (Jagdish et al., 2015).

Mayores rendimientos en soja se atribuyen a mejoras en la distribución de la porosidad del suelo y en el mejor arreglo espacial de los agregados (Calonego y Rosolem, 2010).

La conductividad hidráulica se reduce y los menores valores se encuentran luego de una a cuatro pasadas de un tractor oruga de caucho (Jagdish et al., 2015).

Ha sido reportado que la conductividad hidráulica está directamente relacionada con el espacio de macroporos (Ghildyal y Satyanarayana, citados por Jagdish et al., 2015).

La compactación reduce la conductividad hidráulica saturada debido a la distorsión del recorrido de los flujos, conectividad y la eficacia hidráulica de muchos macroporos. La compactación reacomoda el espacio poroso, resultando en mayor conducción de agua en los mesoporos (Schwen et al., citados por Jagdish et al., 2015).

2.2.4. Humedad

Martino (2003) señala que la disponibilidad de agua es el factor que rige el desarrollo de los cultivos, porque afecta marcadamente la tasa de difusión de oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica de los suelos.

El agua disponible para las plantas, según el concepto clásico, tiene como límite inferior el punto de marchites y como límite superior la capacidad de campo. En la actualidad este concepto es aceptado para condiciones de suelo sin degradación física, pero es cuestionado para condiciones de suelos degradados, donde la densidad aparente y resistencia aumentan, la porosidad se reduce y la distribución y tamaño de los poros se altera (Richard et al. 2001, Álvarez et al. 2006).

Por tales razones, la compactación es un serio problema debido a la interacción entre las propiedades físicas y el crecimiento y productividad de las plantas, lo cual conlleva a la necesidad de disponer de un parámetro que integre las interacciones suelo-planta. En este sentido, estos autores propusieron el rango de agua menos limitativo (LLWR) o intervalo de agua óptimo (IAO) en función de la densidad aparente, aireación y resistencia a la penetración, como un indicador de la calidad física y estructural del suelo, el cual determina una franja de contenido de agua donde las limitaciones asociadas a la aireación, resistencia mecánica y disponibilidad de agua son mínimas.

Los ciclos humedecimiento-secado, crecimiento y muerte de raíces y la fauna edáfica son factores vinculados estrechamente a la resiliencia de los suelos (Taboada 2003, Álvarez et al. 2006).

La disminución de la resistencia con el aumento de humedad se asocia a la reducción de la cohesión y ángulo de fricción interna del suelo (Ruiz et al., 2010).

2.2.5. Estructura y textura del suelo

Las diferencias de COS entre LC y SD son mínimas por lo que la estabilidad de la estructura es la variable que mejor explica las diferencias de manejo.

Una mayor estabilidad de la estructura permite que el suelo resista mejor la energía de compresión resultando en menores valores de DMAX (densidad aparente máxima alcanzada en el contenido hídrico crítico) (Dexter, citado por Álvarez, 2012).

La textura también influye en la compactación del suelo. Suelos de textura media, son más propensos a la compactación que suelos más liviano o más pesados. Suelos de estructura gruesa, la compactación es en sentido vertical, mientras que en estructuras más finas el estrés se propaga multidireccionalmente (Ellies Sch et al. 2000, Jagdish et al. 2015).

Otros autores señalan que a mayor contenido de arcilla indica más compresibilidad. Los suelos arcillosos son más susceptibles a la compactación que los arenosos, a su vez los suelos sueltos lo son más que los ya transitados o duros (Botta et al., 2004).

El comportamiento del suelo compactado no es solo una función de la textura, también está afectada por pH, CIC, espesor de las partículas de arcilla y por la presencia de MO, iones oxido e hidróxido de aluminio libre, el cual determina la naturaleza del resultado de las fuerzas de cohesión de los constituyentes del suelo (Assoiline, citado por Jagdish et al., 2015).

2.2.6. Densidad aparente

La compactación perturba los agregados del suelo comprimiéndolos, formando una capa restrictiva. Por tanto, un menor volumen de suelo provocado

por la compresión de las partículas produce un aumento en la densidad aparente (Chaudhary et al., citados por Jagdish et al., 2015).

En suelos compactados bajo SD se observa un leve aumento de la densidad aparente y un importante aumento en la resistencia a la penetración (Álvarez et al. 2009, Sanzano et al. 2012, Álvarez et al. 2014).

La densidad aparente es un reflejo o está estrechamente relacionada con la porosidad del suelo.

La intensidad del laboreo y el tráfico de las ruedas, incrementan la densidad aparente mientras que una adición de M.O. reduce la dap. del suelo (Da silva et al., citados por Jagdish et al., 2015).

2.3. EFECTOS EN EL CRECIMIENTO VEGETAL

Efectos negativos en el rendimientos de los cultivos atribuidas a impedancias mecánicas en el suelo, fueron reportadas para varios cultivos, en un amplio rango de suelos (Hamza y Anderson 2002, Sadras et al. 2005, Calonego y Rosolem 2010).

Cuando las precipitaciones son menores al promedio, los efectos negativos de la compactación en el rendimiento de los cultivos es mayor (Calonego y Rosolem, 2010).

La compactación del suelo que resulta del tráfico vehicular o sistemas de laboreo, afectan las trasformaciones y la captura de nutrientes debido a cambios en la hidráulica del suelo, aireación y propiedades de difusión, así como efectos en el crecimiento de las raíces y su configuración. La captura de nutrientes se reduce debido a la compactación (Jagdish et al., 2015).

La disminución en el crecimiento de plántulas creciendo en suelo compactado se ha relacionado con la reducción en la conductancia estomática, y reducción en la tasa de división celular, expansión celular y aparición de hoja (Sadras et al., 2005).

Los procesos de captura de recursos por parte de la canopia y del sistema radicular son los más afectados por la compactación debido a una reducción en el crecimiento de los mismos. La eficiencia en el uso de los recursos (radiación y transpiración) son afectados en menor medida y no

parecen ser relevantes en la respuesta de la planta a la compactación (Sadras et al., 2005).

Reducción del crecimiento de los cultivos bajo compactación, se relacionan a la reducción en la habilidad de capturar los recurso y no en la eficiencia de captura (Sadras et al., 2005). La compactación reduce dramáticamente la canopia que intercepta la radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés), y no tiene efecto medido en la eficiencia en el uso de la radiación (RUE por sus siglas en inglés). Por lo que afecta el crecimiento del cultivo a través de cambios en la interceptación de PAR y no en cambios en la RUE (Sadras et al., 2005).

Para trigo y sorgo, variaciones significativas en rendimiento se asocian a la captura de agua, y no hay efectos consistentes entre tratamientos para la variable rendimiento por unidad de evapotranspiración (ET). Para maíz, ambas variables explicaron diferencias entre tratamientos, captura de agua como rendimiento por unidad de ET (Sadras et al., 2005).

La interceptación de la PAR se incrementa hasta los 120 días pos siembra. Durante este período, los cultivos creciendo en los tratamientos con laboreo profundo, interceptan PAR a tasas más rápidas que los tratamientos control o inalterados (Sadras et al., 2005).

Cambios relativos en la evapotranspiración la cual incrementa en suelo compactado, es la consecuencia de la marcada sensibilidad de la expansión foliar a la impedancias mecánicas del suelo (Passioura, citado por Sadras et al., 2005). En un trabajo de Grzesiak (2009) en los tratamientos compactados se redujo el número de hojas, el área de hojas y la MS de brotes y raíces mientras se incrementó la proporción de MS brote-raíz.

La presencia de una capa sub-superficial compactada, afecta la cantidad de raíces y su distribución en el suelo, lo que explica las mejoras en la distribución de las raíces de soja creciendo en suelo descompactado (Calonego y Rosolem 2010, Jagdish et al. 2015). La morfología y el funcionamiento del sistema radicular de las plantas se puede cambiar por varios mecanismos, no solo físicos, sino también biológicos y químicos (Taylor y Brar, citados por Jagdish et al., 2015).

Rosolem y Takahashi, citados por Jagdish et al. (2015) estudiaron el efecto de la compactación subsuperficial en el crecimiento de las raíces y el consumo de nutrientes en el cultivo de soja en un suelo arcillo-arenoso.

Reportan que la compactación sub-superficial incrementa el crecimiento de las raíces en la capa superficial del suelo correspondiendo a un descenso cuadrático en la capa sub-superficial. No encontraron efecto de la compactación sub-superficial en el total de largo de raíces, en el crecimiento de la soja, ni en la absorción de nutrientes. En tanto, en un estudio realizado por Sadras et al. (2005), el crecimiento de las raíces en suelo compactado sub superficialmente, se redujo y la longitud específica de la raíz decreció marcadamente, reflejando el cambio morfológico de las raíces en suelo compactado sub-superficialmente. Resultados similares obtuvo Jagdish et al. (2015) en maíz.

La capa compactada del suelo, confina las raíces a la parte superficial, por la alta fuerza del suelo y la densidad aparente; la capa compactada en cambio, retiene más humedad para el uso de los cultivos (Laboski et al., citados por Jagdish et al., 2015). Al descompactar el suelo baja la concentración de raíces cerca de la base de la planta en comparación a las plantas de la parcela no subsolada (Abu-Hamdeh, citado por Jagdish et al., 2015).

Las raíces de soja reducen 10% su crecimiento cuando la resistencia a la penetración es de 520 HPa. (Dap de 1,45 mg. m⁻³) y 50% cuando la resistencia a la penetración es de 1450 HPa. (Dap de 1,69 Mg. m⁻³) (Hamza y Anderson 2005, Rosolem y Takahashi, citados por Jagdish et al. 2015).

La disponibilidad de agua, caracterizada con el límite inferior de agua disponible de la planta, podría parcialmente explicar el efecto de la compactación del suelo y labranza profunda sobre el crecimiento del cultivo y la evapotranspiración. A largo plazo simulaciones de la dinámica del agua en suelos compactados y descompactados indicaron cambios importantes en el destino del agua en suelos arenosos, incluyendo un aumento moderado evapotranspiración, una reducción sustancial de E:ET y reducciones importantes en la frecuencia y la velocidad de drenaje más allá de la zona de raíces del cultivo (Sadras et al., 2005).

2.4. MÉTODOS PARA MEDIR COMPACTACIÓN

La compactación se determina a través de la medición directa de propiedades del suelo como: densidad de volumen, porosidad total, índice de poros, volumen específico, y de forma indirecta por su acción sobre estas y

otras propiedades que influyen en la resistencia a la penetración, la permeabilidad al aire y al agua (Johnson y Bailey, 2002).

La fuerza del suelo es usada como medida de la compactación debido a que refleja la resistencia que ofrece el suelo a la penetración de las raíces (Hamza y Anderson, 2002).

Letey, citado por Martino (2003) analizó la relación entre las propiedades físicas del suelo y la productividad de los cultivos, y estableció que, aun cuando un gran número de variables (tales como densidad aparente, distribución del tamaño de poros y estabilidad de agregados) tienen una gran influencia en el crecimiento de las raíces, éste es en última instancia gobernado solamente por cuatro propiedades fundamentales: la resistencia mecánica, la disponibilidad de agua, oxígeno y energía. Las propiedades medibles asociadas con estos factores son, respectivamente, la resistencia a la penetración de sondas metálicas (RP), el potencial de agua en el suelo, la tasa de difusión de oxígeno y la temperatura.

El riesgo de un suelo de sufrir compactación puede ser medido por medio de un test de compactabilidad de Proctor (realizado en laboratorio). Este test correlaciona la densidad aparente con la humedad del suelo, aplicándole cierto grado de compactación resulta en la susceptibilidad del suelo a la compactación (Álvarez, 2012).

La compresibilidad del suelo se refiere a la facilidad con la cual decrece en volumen cuando está soportando una presión aplicada. Esta es una propiedad del suelo y es análoga al índice de compresión del suelo (Cc). El índice de compresión se determina a través de ensayos de compresión uniaxial, los cuales pueden ser realizados en una cámara triaxial o en un edómetro. Mayores valores de este indican mayor compresibilidad o susceptibilidad a la compactación (Keller et al., 2004).

2.5. FORMAS DE CORREGIR EL PROBLEMA Y SU IMPACTO

Existen dos formas de hacer frente a la compactación del suelo, una es previniendo que esta ocurra y la otra es solucionar el problema ya presente en el campo. Dentro del primer grupo se destacan técnicas como: control de tránsito, peso de maquinaria, momento de pasaje (humedad del suelo), correcta

selección y planificación de las rotaciones, adicionar M.O, controlar el pastoreo, etc. En el segundo grupo se encuentran las técnicas de descompactación tanto biológicas como mecánicas (Alakukku et al. 2003, Hamza y Anderson 2005, Álvarez et al. 2014).

Las opciones de mitigación del problema ya establecido son más costosas no solo económicamente sino también ambientalmente, ya que generan mayores pérdidas de N por lixiviación y de emisión de CO₂ (Chamen et al., 2015).

2.5.1. Respuesta a la descompactación sub-superficial

La descompactación subsuperficial debe realizarse una vez identificada la capa de suelo de mayor densidad aparente, de forma que al pasar la herramienta se ajuste la profundidad de forma de llegar a dicha capa (Jorajuría, 2014). La complejidad para solucionar los problemas de compactación sub-superficial es mayor que para compactación superficial ya que se requiere mayor energía. Y a su vez, la mayor actividad biológica por parte de los microorganismos y demás se encuentra en superficie (Álvarez et al., 2014). No obstante, se ha vuelto una práctica común para romper la densa capa del horizonte subsuperficial que limita la percolación y la penetración de las raíces (Bateman y Chanasyk, 2001).

El laboreo profundo en suelo compactado mejorara la “salud” del suelo y la habilidad de la plantas a resistir las enfermedades. Reduce dramáticamente la resistencia a la penetración entre 10 y 20-30cm. También mejora la forma de las raíces y la extensión vertical (Hamza y Anderson 2005, Sadras et al. 2005).

2.5.1.1. Respuesta en rendimiento

El impacto de la descompactación sobre los rendimientos varía en función de las condiciones físicas, edáficas, la estación de crecimiento, el cultivo, el manejo, y las condiciones climáticas (Álvarez et al., 2009). La respuesta actual al laboreo profundo depende de las condiciones del año, tipo de suelo y cantidad inicial y distribución de agua en el perfil del suelo.

Álvarez et al. (2014) en una recopilación de 4 ensayos obtuvieron respuestas de 6% en el rendimiento de soja, y 7% para maíz de 5 ensayos, donde también se registraron respuestas negativas a la descompactación del suelo, mayormente en suelos arenosos. Concluyendo un bajo impacto de la práctica sobre el rendimiento.

Álvarez et al. (2009) obtuvieron respuesta en maíz a la descompactación de 659 kg/ha, en términos relativos 5,56% (variando entre 2,3-9,7%).

En trabajo realizado por Sadras et al. (2005) la mejora en rendimiento debido al alivio en la compactación va desde nula hasta 43%; la residualidad de la respuesta es de hasta dos ciclos de cultivos.

El incremento en rendimiento atribuible al laboreo profundo fue de 43% en la colina y 20% en la pendiente. La biomasa de los brotes representa la mayor variación en el rendimiento en grano ($r^2 = 0,96$).

El rendimiento en grano (en trigo), el laboreo profundo no tuvo efecto en rendimiento en grano en planos franco arenoso. En colinas arenosas, el incremento en rendimiento vario entre 5% y 36%. La biomasa de los brotes fue la variable que más explico el incremento en rendimiento para todos los datos ($r^2 = 0,69$) (Sadras et al., 2005).

En un trabajo realizado por Álvarez et al. (2009), en suelos franco limosos en maíz bajo siembra directa. Los incrementos en rendimiento, frente al pasaje de la herramienta de descompactación; se debió a una mayor disponibilidad hídrica debido a una mayor infiltración, y mayor accesibilidad a los recursos (agua, nutrientes, etc.) debido a la menor resistencia a la penetración (seguramente mayor exploración radicular-no medida en el trabajo). Sin mostrar efectos significativos en la densidad aparente y en la disponibilidad de nitratos en el suelo.

Los resultados anteriores son coincidentes con los presentados en la revisión de Hamza y Anderson (2005); donde se atribuyen los mayores rendimientos a la reducción en la fuerza del suelo y en el incremento de la permeabilidad del agua.

El incremento en la transpiración y la intercepción de PAR contabilizan totalmente el incremento en el crecimiento del cultivo asociada al alivio en la

compactación; el laboreo profundo no afectó la eficiencia en la transpiración ni en la eficiencia de uso de la radiación (Sadras et al., 2005).

2.5.1.2. Relación entre la respuesta a la descompactación subsuperficial y la condición hídrica del suelo

La práctica de descompactación suele presentar mayor impacto sobre el rendimiento en condiciones de estrés hídrico moderado, siendo este impacto mínimo o nulo en condiciones de estrés hídrico severo o de alta humedad (Sadras et al. 2005, Álvarez et al. 2009).

Los beneficios en rendimiento del laboreo profundo se espera que sean menores en años extremadamente secos o extremadamente húmedos y cuando el suelo luego de la zona compactada este húmedo (Sadras et al., 2005). Barberans y Díaz, citados por Sadras et al. (2005), reportan una relación inversa entre la respuesta de la soja al laboreo profundo y la acumulación de lluvias por encima de los 760mm.

En un ensayo de 7 años, el incremento en la disponibilidad de agua del suelo representó el 53% de la respuesta en rendimiento al laboreo profundo en el cultivo de soja en Bolivia, donde no hubo respuesta en rendimiento en años lluviosos (Barberans y Díaz, citados por Sadras et al., 2005).

En una simulación realizada por Sadras et al. (2005), la respuesta al rendimiento al laboreo fue mínima en períodos extremadamente secos o extremadamente húmedos. El modelo asume que el mayor efecto del laboreo profundo está asociado al acceso del almacenamiento del agua en el suelo. La mejora en los rendimientos asociada al laboreo profundo se relacionan a cambios en la proporción del agua evapotranspirada, que a cambios en el total de agua usada.

Perfiles de contenido de agua en suelo, indican que el límite superior de la capacidad de almacenamiento fue en gran parte no afectada por la descompactación, de todas formas, el laboreo reduce el límite inferior del agua disponible para las plantas en la mitad inferior del perfil (Sadras et al., 2005).

Si el desarrollo de la raíz es alterado por cambios en la compactación del suelo, sobre el suelo el crecimiento puede ser normal, si la planta puede obtener suficiente agua y nutrientes (Jagdish et al., 2015).

2.5.1.3. Efecto residual de la descompactación subsuperficial

Lo negativo de la práctica de descompactación mecánica es la mayor vulnerabilidad con que queda el suelo a la re compactación por las subsiguientes pasadas de maquinaria y el pisoteo (Spoor, citado por Hamza y Anderson 2005, Álvarez et al. 2009, Álvarez et al. 2014).

El principal agente de re compactación es el agua que infiltra a través del suelo. Busscher, citado por Hamza y Anderson (2005) indica que la lluvia acumulada fue el factor que explico en mayor medida la re compactación, explicando entre un 67 y 91%.

El efecto residual de la práctica depende del manejo posterior (Álvarez et al., 2014).

La descompactación produjo resultados positivos de corto plazo sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento de maíz pero no se observó efecto residual sobre el/los cultivo/s subsiguientes (Álvarez et al., 2009).

Álvarez et al. (2009), muestran una baja perdurabilidad de la práctica de descompactación sobre el ingreso de agua al perfil de suelo. Este efecto de corto plazo podría atribuirse a que la macroporosidad creada por el implemento mecánico fue inestable, y el efecto se revirtió por el acomodamiento de los agregados y de las partículas del suelo.

Para prevenir la re compactación y ayudar a reformar la estructura, Hamza y Anderson (2005) recomiendan la unión con un agente floculante (yeso o M.O).

Cultivos de cobertura con fuertes sistemas radiculares ayudan a alargar la residualidad de la práctica de descompactación (Calonego y Rosolem, 2010).

2.5.2. Raíces de las plantas

La presencia de raíces vivas que aseguren un entramado radical de forma de mantener una buena estructura del suelo, es un mecanismo importante para corregir y prevenir la compactación. Principalmente en suelos limo-arcillosos con arcillas no expansivas. Por lo tanto se sugiere rotaciones que mantengan raíces vivas en el suelo el mayor tiempo posible, como cultivos de cobertura y doble cultivos (Álvarez et al. 2014, Jagdish et al. 2015).

Calonego y Rosolem (2010), obtuvo mayores rendimientos en soja, con cultivos de cobertura con sistemas radiculares agresivos capaces de penetrar la capa de suelo compactada, pudiendo dicha práctica suplantar la descompactación mecánica.

La habilidad de las plantas de penetrar el suelo es restringida cuando la fuerza del suelo se incrementa (Mason et al., citados por Hamza y Anderson, 2005) y cesa en alrededor de 2,5 kpa (Taylor, citado por Hamza y Anderson, 2005).

Si la fuerza hidrostática no es suficiente para atravesar la resistencia de la pared e impedancia del suelo, la elongación de la raíz cesa (Hamza y Anderson, 2005).

Plantas creciendo en suelo compactado, presentan menor número de raíces laterales con menos materia seca que plantas creciendo en condiciones controladas tanto en bajo como en alto contenido de agua (Panayiotopoulos et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

La fluctuación en el diámetro de la raíz entre el día y la noche desestabiliza el suelo y afloja la compactación (Hamza y Anderson, 2005).

Hay diferencias notorias entre especies, en su habilidad de penetrar capas de suelo compactadas (Singh y Sainju, citados por Hamza y Anderson, 2005).

Si hay suficiente suelo superficial para el crecimiento de las raíces, las mismas se concentrarán allí aumentando su densidad en la capa superficial sin afectar significativamente el crecimiento (Hamza y Anderson 2005, Calonego y Rosolem 2010).

2.5.3. Adición de materia orgánica

Adicionar materia orgánica (M.O) en la capa superficial del suelo, a través de la incorporación por residuos de plantas o aplicación manual ha sido muy estudiado en muchos trabajos (Soane 1990, Ohu et al. 1994, Hamza y Anderson 2002). Sin embargo, incorporar M.O al subsuelo es menos común ya que es una técnica dificultosa y económicamente menos favorable (Hamza y Anderson, 2005). Si bien los residuos de plantas son la forma más común de incorporar M.O, el estiércol de animal también es usado para reducir la compactación y mejorar la fertilidad (Hamza y Anderson, 2005).

La especie de planta y el método de incorporación influyen fuertemente en la eficiencia del proceso. En cuanto a la especie de plantas, la relación C/N define el tiempo de descomposición del residuo (Hamza y Anderson, 2005).

Los materiales orgánicos poseen menores densidad aparente y mayor porosidad que los materiales minerales (Martin y Stephens, citados por Hamza y Anderson, 2005).

El tipo de materia orgánica es también importante, la M.O fácilmente oxidable es más importante en determinar el comportamiento mecánico en el suelo (Ball et al., citados por Hamza y Anderson, 2005). Por otro lado la M.O menos humificada, tiene mayores efectos en el incremento de la porosidad y la fuerza de tensión de los agregados (Zhang et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

Manteniendo un adecuado nivel de COS en el suelo, se mantiene una estructura estabilizada (Thomas et al., citados por Hamza y Anderson 2005, Álvarez et al. 2014) y decrece la densidad aparente (Carter, citado por Hamza y Anderson 2005) haciendo más resistente al suelo frente a la degradación (Hamza y Anderson 2005, Jagdish et al. 2015).

2.5.4. Control del pastoreo

El impacto del pisoteo por animales puede ser reducido si la superficie es cubierta por vegetación (Greene et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

Los efectos de la vegetación en la estructura del suelo son significativos en períodos en que el suelo está húmedo, y se sugiere que debe ser regulado el pisoteo en estos períodos húmedos (Hamza y Anderson, 2005).

2.5.5. Control del tráfico

El control del tráfico es un sistema que consiste en planificar y controlar el pasaje de maquinaria por la chacra. De esta forma, ayuda a mantener una zona más favorable para el crecimiento de las plantas restringiendo el pasaje de la maquinaria sobre carriles de tráfico (Braunack et al., citados por Hamza y Anderson, 2005) quedando así, una zona muy compactada y una zona sin perturbar apta para el desarrollo radicular (Kayombo y Lal, citados por Hamza y Anderson 2005, Kingwell y Fuchsbichler 2011).

El control del tránsito no solo implica el pasaje por determinados sitios, sino también implica entrar a la chacra en momentos adecuados, con el menor contenido de humedad del suelo posible; buscando la máxima capacidad portante del suelo (Álvarez et al., 2014). Ya que bajo estas condiciones el suelo está más propenso a la compactación debido a la reducción en la estabilidad de los agregados y la lubricación de las partículas por la mayor humedad (Jagdish et al., 2015).

Según Hamza y Anderson (2005), el tráfico controlado enlentece la recompactación en un suelo laboreado, aumenta la infiltración, reduce el patinaje de las ruedas, minimiza las pérdidas de N por la reducción de la emisión de N₂O, mejora la estructura del suelo, incrementa la humedad, reduce la escorrentía y hace las operaciones de campo más oportunas y precisas.

La huellas de las ruedas en este sistema ocupan 20% del área, pero estas pérdidas se compensan con mayores rendimientos en las zonas descompactadas (Hamza y Anderson 2005, Kingwell y Fuchsbichler 2011, Jagdish et al. 2015).

A pesar de todas las ventajas, algunos autores afirman que no hay ventajas en las propiedades del suelo o en el rendimiento utilizando el control de tráfico (Nraunack et al., citados por Hamza y Anderson, 2005).

Otra medida a tomar consiste en limitar el peso de maquinaria, usando maquinaria liviana o menor peso del eje de forma de minimizar la compresión del suelo (Jagdish et al., 2015).

Reduciendo la presión de contacto con el suelo en sistemas con vehículos, maquinas e implementos equipados con “tracks” o llantas más largas que las estándar con menor presión (como las llantas radiales), son sugeridas para incrementar la eficiencia de tracción y reducir la presión de contacto rueda/suelo y por tanto el potencial de compactación (Hamza y Anderson, 2005).

2.6. HERRAMIENTAS GEOESTADÍSTICAS COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN

La geoestadística se trata de una herramienta estadística con la cual se analiza y modela el comportamiento de una variable en el espacio (Webster y Oliver, 2013).

Según Webster y Oliver (2013) para el correcto estudio geoestadístico de una variable se deben cumplir tres etapas: análisis exploratorio de la variable, análisis estructural y predicción.

En el análisis exploratorio se estudia la variable sin tener en cuenta la distribución geográfica; obteniendo las principales medidas de resumen estadístico de la misma. Se comprueba la consistencia de los datos y se analiza la distribución de la variable. Para ello se realizan diferentes gráficos para describir la distribución, simetría y variabilidad de la variable estudiada, mediante histogramas de frecuencias, box-plot, qqnormal y pruebas de normalidad como el test de Shapiro - Wilks.

En una segunda etapa; el análisis estructural, se estudia la continuidad espacial de variable a través de un estadístico que incorpore la posición y la distancia entre las observaciones. Esto generalmente se evalúa mediante semivarianzas o correlaciones espaciales, que se describen gráficamente en variogramas, correlogramas u otro similar que muestre la variación espacial. Para ello se ajusta con los datos obtenidos diferentes variogramas empíricos, escogiendo el de mayor ajuste.

Por último se realiza la predicción, estimando los valores de la variable en los puntos no muestreados, considerando la estructura espacial seleccionada previamente complementada con la información obtenida directamente en los puntos de muestreo, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas, mediante el método de Kriging.

Para realizar dicha predicción es necesario realizar una grilla de muestreo, la misma consiste en una serie de puntos de muestreo distribuidos en el espacio del ensayo, donde los puntos pueden ser tomados de forma uniforme o aleatoria dentro de ellas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ENSAYO

3.1.1. Descripción del sitio experimental

El trabajo de campo fue realizado en la zafra de verano 2014-2015, en una chacra comercial del establecimiento “La Manera” (33°16'36,00”S, 57°25'21,00”O, 101m de elevación) por la ruta 14, en el departamento de Soriano, Uruguay. La chacra la cual se instaló el experimento abarca suelos de la Unidad Risso (escala 1-1.000.000) según la carta de reconocimiento de suelos de Uruguay, grupo de suelos CONEAT 10.1 (MGAP. RENARE. CONEAT, 2015) y tiene 15 años de agricultura continua sin laboreo.

Con los antecedentes mencionados junto con el mapa de conductividad eléctrica realizado en base a las mediciones hechas previo a la siembra, se procedió a la caracterización edáfica del sitio, realizando 9 perfiles ubicados en las zonas seleccionadas por diferente conductividad eléctrica aparente.

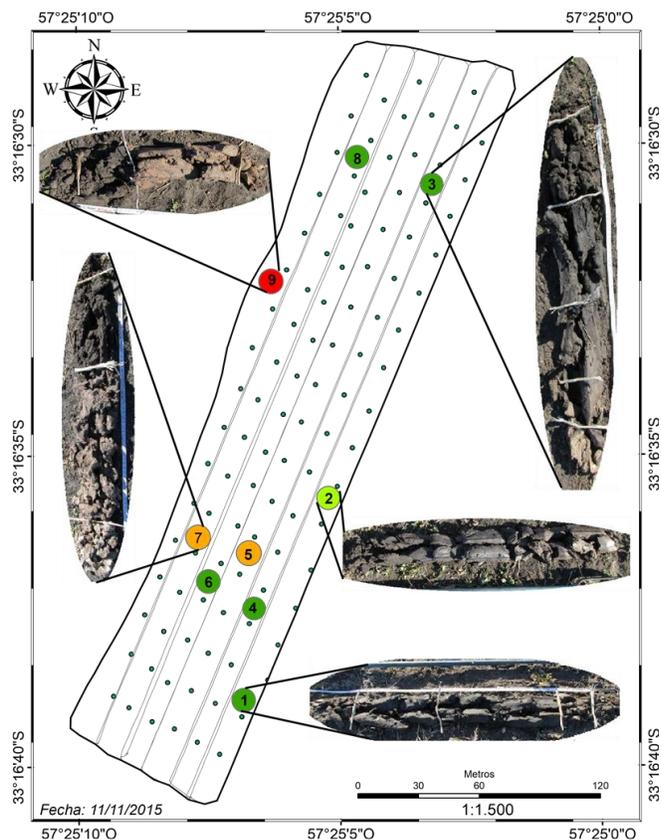


Figura No. 1. Mapa con perfiles de suelos representativos y grilla de muestreo

Los perfiles 1, 4, 6, 3, y 8 marcados en la figura No. 1 con color verde oscuro se caracterizan por ser los más profundos, con horizonte Bt muy pesado y espeso ubicados en zonas topográficamente bajas. Estos suelos tienen en general un horizonte A corto (9 cm) perturbado y horizonte Bt muy profundos (60 cm), con alto contenido de arcilla (42% en promedio), los cuales son más susceptibles a la compactación.

Los perfiles 5 y 7 marcados con color naranja son de color más grisáceo debido a la presencia de carbonatos de Ca y con horizonte BCk con mayor espesor (33 cm). El horizonte A de estos perfiles es, al igual que el otro grupo, de bajo espesor (8 cm).

El perfil 9 de color rojo en la figura No. 1, integra el grupo de perfiles de menor espesor (52 cm de espesor total) con colores rojizos en la sub superficie básicamente en los horizontes BC y C.

Por último, el perfil 2 integra un grupo transicional entre lo que sería el grupo de los verdes oscuros y los anteriores de color rojo ya que son perfiles con espesores de 80-90 cm pero con horizonte Bt con menor espesor (35 cm). El resto de las características son similares a los perfiles del grupo de color verde oscuro (horizonte Bt con 40% de arcilla y horizonte A de 10 cm de espesor).

3.1.2. Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron dos tratamientos con tres repeticiones: descompactación sub-superficial con pasaje de paraplow (C/P) y testigo sin descompactar con paraplow, (S/P) lo que corresponde a siembra sin laboreo.

Los tratamientos se ubicaron en 6 fajas, de 350 metros de largo x 14 m de ancho, de manera de abarcar distintos suelos y altura en el paisaje (figura No. 2).

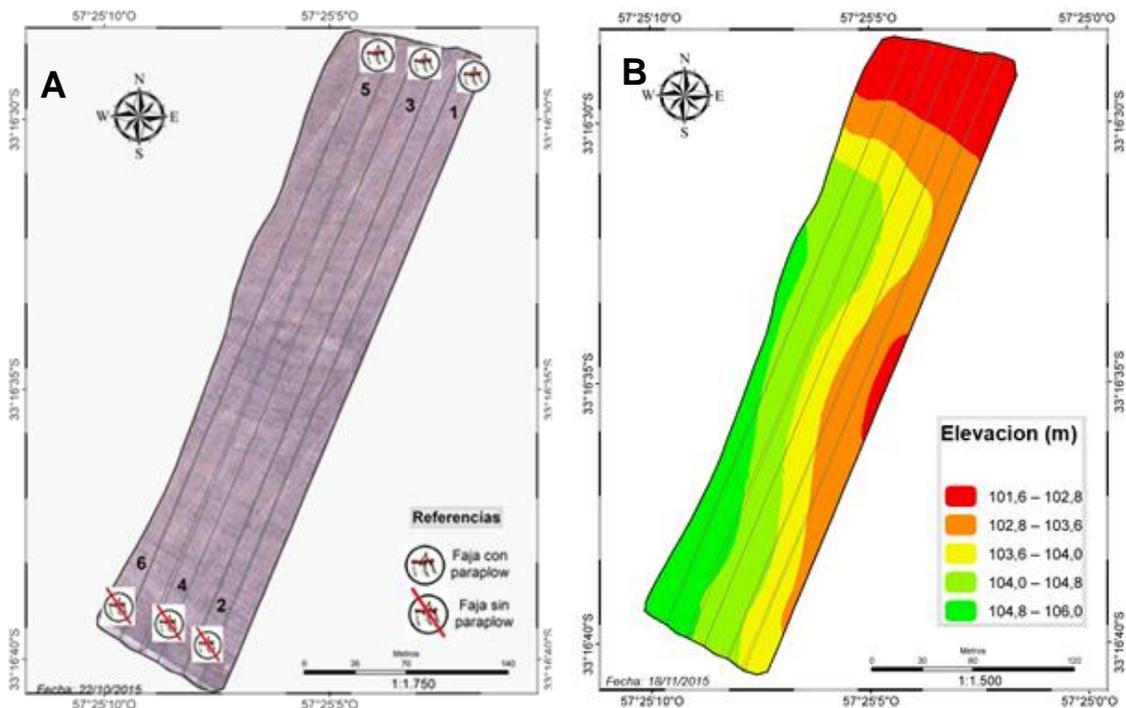


Figura No. 2. Mapas de diseño del ensayo (A) y elevación del terreno (B)

La descompactación se realizó el 15/3/2014, utilizando un paraplow con un objetivo de profundidad de trabajo de 0,45m.

El cultivo utilizado para evaluar la respuesta fue soja, cultivar Cardinal 590, sembrado a 0,35m entre filas el 15/11/2014 con plantadora neumática para siembra directa.

3.1.3. Manejo del cultivo

Previo a la siembra del cultivo de soja había un cultivo de cobertura de avena. El verano anterior fue una soja de segunda (2200 kg/ha).

Cuadro No. 1. Manejo del cultivo

Fecha	Manejo	Detalle
30/09/2014	Análisis suelo	P Bray: 6,6 ppm. Ph: 6,35 M.O.: 4,1% K: 0,49 meq/100g K
01/10/2014	Herbicida-inicio barbecho	Glifosato con amina
15/10/2014	Fertilización	160 kg 0-46-0 (supertriple)
15/11/2014	Siembra	Soja Cardinal 590 435 000 semillas/ha 38 cm distancia entre surcos Con plantadora neumática Curada con apront RFC Inoculada con Turba
17/11/2014	Herbicida	Glifosato con Spider
02/01/2015	Insecticida (p./lagarta)	Alsistyn con glifosato
17/02/2015	Insecticida (p./lagarta y	Clorpirifos, engeo

	chinche)	
17/02/2015	Fungicida	Asoxi
17/03/2015	Insecticida (p./lagarta y chinche)	Clorpirifos, engeo
16/04/2015	Cosecha	Rendimiento promedio (de la chacra): 2930 kg/ha.

3.1.4. Determinaciones

Todas las variables de respuesta se cuantificaron en una grilla rectangular de muestreo georreferenciada cada punto distanciado a 20m, dentro de cada faja, de manera de captar la variabilidad espacial (figura No. 2).

3.1.4.1. En el suelo

-Conductividad eléctrica aparente ($Cea\ s\ s^{-1}$) a 15 y 30 cm insertando en el suelo un sensor portátil Spectrum EC110. Por sitio de muestreo se realizaron dos inserciones, siendo promediados los datos de ambas. Las mediciones se realizaron en el mismo momento que la resistencia a la penetración del suelo, con humedad cercana a capacidad de campo.

-Resistencia a la penetración en suelo hasta los 40cm de profundidad en suelo húmedo se cuantificó utilizando un penetrógrafo digital Rimik CP20. Se registraron valores a intervalos verticales de 2 cm hasta una profundidad de 40 cm. Posteriormente se calcularon valores promedio para intervalos de 0-8cm, 8 a 20 cm y 20 a 40 cm.

-Profundidad a la cual se alcanzó los 2MPa cm² de resistencia en suelo húmedo (14/11/2014, cercano a capacidad de campo) y seco (28/11/2014, cercano a 50% de capacidad de campo) se realizó con un penetrómetro manual soil compactation tester Dikey John.

-Humedad del suelo en los primeros 7cm con sonda TDR (Soil Moisture Equipment Corp) en los mismos sitios que resistencia a la penetración del suelo y CE.

-**Textura.** Se determinó textura por el método Bouyucos por horizonte de cada perfil de suelo descripto.

- Propiedades químicas del suelo

Se tomaron 5 muestras de suelo de la capa superficial (0-15 cm) compuestas por 10 tomas con calador, que a su vez se dividieron en dos profundidades (0-7,5 cm y 7,5- 15 cm). Las muestras se conservaron en bolsas plásticas en refrigerador hasta ser secadas en estufa de aire forzado a 40 °C durante 48 h y posteriormente molidas hasta pasar a través de una malla de 2 mm. Se realizó extracción de bases intercambiables con acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$)1M con una relación suelo solución 1:10, a partir de la cual se analizó K y sodio (Na) por espectrofotometría de emisión, y calcio (Ca) y Magnesio (Mg) intercambiables por lectura en espectrofómeto de absorción atómica modelo 373 (Perkin Elmer Inc., Waltham, MA, EUA). A su vez fueron analizados P disponible mediante Bray 1 y materia orgánica por el método de oxidación con dicromato. Todos los análisis químicos se realizaron a ambas profundidades, siendo promediados posteriormente dentro de cada sitio asumiendo densidad aparente constante, para obtener datos correspondientes a la profundidad 0-15 cm.

3.1.4.2. En el cultivo

-El 28/11/14 se midió implantación, promediando en dos metros lineales en dos sitios en cada punto de muestreo.

-El 16/1/15 se midió altura en 20 plantas por cada faja y se sacaron dos plantas en 25 sitios por cada faja. El par de plantas se secó en el laboratorio en estufa a 60°C durante tres días y se pesó la materia seca. Se estableció fenología del cultivo en cada faja.

-Cultivo en estadio R1 el 29 de enero del 2015.

-El 12/2/15 con el cultivo en estadio R2; se midió NDVI con un sensor multi-espectral, banda 5-3-2 RGB falso color compuesto montado en una avioneta. La determinación fue realizada por la empresa Agricultura por Ambiente, ADP.

-En estadio R3 (18/2/15), se determinó temperatura de follaje utilizando un sensor manual UEi Inf 150, promediando 5 disparos por sitio.

- El 18/2/15, en plantas en R3 se muestrearon 5 folíolos apicales desarrollados y con pecíolo por cada sitio georreferenciado. En el laboratorio se secaron en estufa a 60°C y luego se molieron para realizar análisis foliar de Nt, P, K, Na, Mg y Ca.

-El 8/4/15 previo a la cosecha comercial, se realizó un muestreo para estimar el rendimiento de cada celda. Se cuantificaron los componentes del rendimiento (vainas y nudo por tallo, peso de grano y número de grano por planta) en una muestra de 7 plantas consecutivas de un amisma fila del centro de la celda.

-La cosecha con cosechadora se realizó el 9/4/2015, pesándose el grano obtenido en cada faja y corregida la humedad a 13%.

-El 8/7/15 se realizaron 9 perfiles de suelo con taladro holandés, en zonas topográficas y edáficas diferentes dentro del ensayo.

3.1.5. Análisis estadístico de resultados

Se realizó un resumen de estadísticas descriptivas de las variables evaluadas a través de la media, desvío estándar, coeficiente de variación y percentiles 10 y 90.

3.1.5.1. Respuesta a la descompactación cuantificada en el suelo y en respuesta vegetal

Se compararon estadísticamente los tratamientos con un análisis de varianza para todas las variables utilizando los sitios de muestreo dentro de faja como **error de muestreo**. Se estudió la regresión simple entre rendimiento en grano y resistencia a la penetración del suelo presentándose de manera gráfica por ubicación de puntos en cuadrantes.

3.1.5.2. Determinación de zonas con compactación diferencial

Se identificaron tres zonas contrastantes por su resistencia a la penetración pre-tratamiento y pos-tratamiento, para lo cual se realizó el kriging para las fajas descompactadas y para las fajas testigos. Las zonas se identificaron en base al estrato de profundidad con mejor ajuste del semivariograma, que resultó ser el estrato 8-20 cm (ver anexo).

Cuadro No. 2. Caracterización de las zonas definidas dentro del área experimental

Zona	Resistencia a la penetración del suelo pre-tratamiento	Resistencia a la penetración del suelo post-tratamiento
1	Alta	Alta
2	Alta	Baja
3	Baja	Baja

Las zonas se realizaron generando mapas (kriging) por cuantiles. Se identificaron utilizando la superposición de mapas interpolados de resistencia a la penetración del suelo, a partir de los datos de las parcelas sin descompactar y el de resistencia a la penetración del suelo post-tratamiento. Para esto se utilizó el software ArcGIS 10.0, kriging de tipo ordinario ajustando el semivariograma con un modelo exponencial.

3.1.5.3. Respuesta espacial a la descompactación cuantificada en el suelo y en respuesta vegetal

El primer paso fue realizar un análisis de varianza utilizando un modelo de tratamientos en **bloques al azar** considerando como error de muestreo la variación dentro de parcela.

Posteriormente se realizó el estudio de la **correlación espacial** de las determinaciones (análisis geoestadístico) utilizando el software ArcGIS 10.0. El mismo consistió en un estudio previo exploratorio de cada variable. Luego se

ajustó el semivariograma con el modelo de mejor ajuste (visual) para cada variable (exponencial en todos los casos, probándose también el esférico), para realizar interpolaciones mediante el procedimiento geoestadístico Kriging de tipo ordinario, siguiendo los pasos indicados por Webster y Oliver (2013). Se analizó la relación **pepita/umbral**, clasificando la correlación espacial como fuerte (**menor a 0,25**) o moderada (**entre 0,25 y 0,75 respectivamente**) (Best y León, 2006).

Las variables que presentaron autocorrelación espacial fuerte, altos coeficientes de determinación entre estimado y observado y bajo error estándar, fueron interpoladas para generar mapas continuos de las variables estimadas.

3.1.5.4. Respuesta vegetal a la descompactación del suelo por zona

Una vez identificadas las zonas con compactación diferencial se procedió a realizar un análisis de varianza incorporando la **zona como variable de clasificación**, considerando la interacción **repetición por zona como Error "a"** y tratamiento por repetición como error experimental y los puntos de muestro como error de muestreo, La separación de medias se realizó utilizando la prueba MDS de Fisher al 5%.

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 el sitio experimental ocurrieron lluvias muy superiores del promedio histórico entre setiembre y enero, revirtiéndose esta situación a partir de febrero y hasta después de la cosecha del cultivo (figura No. 3).

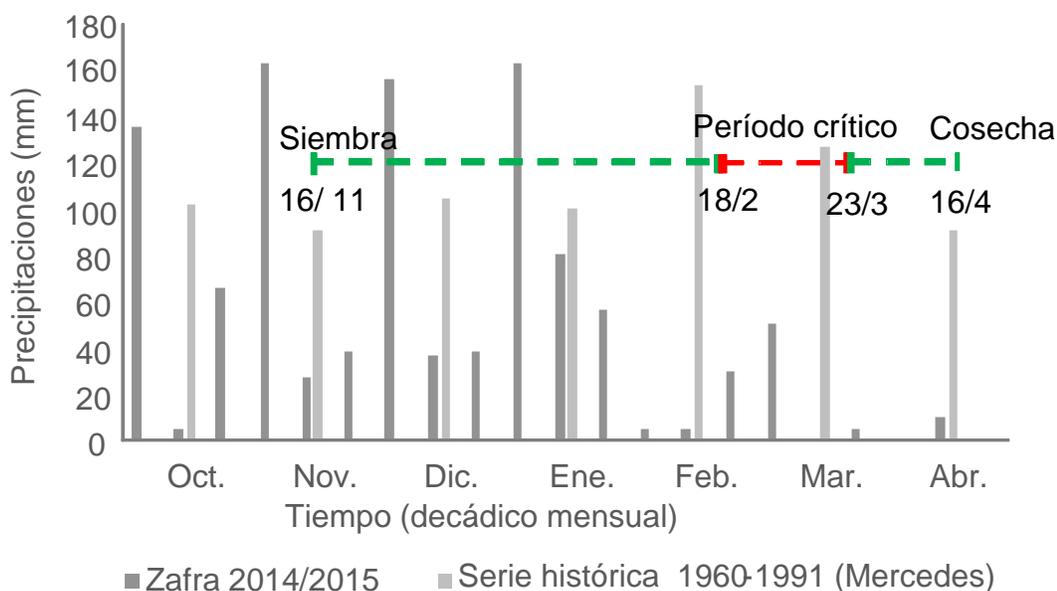


Figura No. 3. Precipitaciones decádicas acumuladas entre octubre 2014 y abril 2015 incluidos, media histórica de precipitaciones para los mismos períodos y ubicación temporal de las fase vegetativa (siembra a R1) y reproductiva (R1- cosecha) del cultivo de soja. La línea roja marca período crítico de definición del rendimiento en grano (entre R4-R6).

Las condiciones hídricas resultaron favorables para el cultivo, con un muy buen crecimiento durante la etapa vegetativa (589 mm en período vegetativo). Posteriormente con el cultivo en el período crítico (R4-R6), se generaron condiciones de déficit hídrico progresivo (131 mm en período crítico), afectando por tanto la concreción del rendimiento generado en etapas anteriores.

4.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA

4.2.1. Descripción estadística general

En el cuadro No. 3 se presentan los principales indicadores de dispersión de las variables cuantificadas.

Cuadro No. 3. Indicadores de localización y dispersión para las variables de respuesta

	Media	Desvío Estándar	Coefficiente Variación (%)	P.(10)	P.(90)
<u>Determinaciones en suelo</u>					
Humedad (cm/cm ³)	36	9	26	24	47
Conductividad a 15 cm (s.s ⁻¹)	931	294	32	620	1330
Conductividad a 30 cm (s.s ⁻¹)	1275	297	23	855	1630
Profundidad a la que se alcanzó los 2000 HPa. cm ² en suelo húmedo (cm)	34	15	44	17	60
Profundidad a la que se alcanzó los 2000 HPa. cm ² en suelo seco (cm)	27	7	24	22	32

Resistencia a la penetración de 0-8 cm (HPa.)	713	250	35	420,6	1039
Resistencia a la penetración de 8-20 cm (HPa.)	1185	284	24	850,5	1591
Resistencia a la penetración de 20-40cm (HPa.)	1415	241	17	1132	1725
pH H ₂ O	5,6	0,3	4	5	6
pH KCl	4,5	0,2	5	4	5
Materia orgánica (%)	5,4	0,4	7	5	6
P (ppm.)	19,5	6,4	33	13	29
K(meq./100 g suelo)	0,4	0,07	15	0,4	0,5
Na (meq./100 g suelo)	0,2	0,03	16	0,1	0,2
Ca (meq./100 g suelo)	24	3,9	16	20	29
Mg (meq./100 g suelo)	3,4	0,4	14	3,8	3,8
<u>Determinaciones en el cultivo</u>					
Población (plantas/m ²)	37	5	13	31	43
Temperatura de hoja (°C)	23	1,7	8	21	25
Índice verde normalizado (NDVI)	0,69	0,07	10	0,6	0,8
Nt (% en planta)	4,9	0,3	5	4,6	5,3
P (% en planta)	0,5	0,1	20	0,4	0,6
K (% en planta)	1,7	0,3	19	1,3	2,1

Na (% en planta)	0,04	0,04	98	0,01	0,11
Mg (% en planta)	0,4	0,06	16	0,3	0,5
Ca (% en planta)	1,2	0,3	22	0,9	1,5
No. nudos/tallo	20	1	6	19	22
No. vainas/planta	45	11	24	33	57
Peso de grano	13	0,6	4	12	14
Rendimiento (kg/ha)	3943	1181	30	2811	5087

Conductividad eléctrica presentó una variación de los datos mayor en superficie que en profundidad al igual que la resistencia a la penetración que a medida que aumenta la profundidad de medición disminuye la variabilidad de los datos obtenidos (35, 24 y 17% de CV a 0-8, 8-20 y 20-40 cm respectivamente). También se puede observar que los datos de resistencia a la penetración fueron más variables medidos con suelo húmedo que con suelo seco (44 y 24% respectivamente).

El estudio químico del suelo se realizó únicamente en las fajas sin paraplows de forma de caracterizar el suelo en estado imperturbado. El nivel de P (19,5 ppm.) estuvo por encima del nivel crítico para soja (11-12 ppm.), el % de MO en rangos aceptables para el cultivo y el K se encontró sobre los niveles críticos para suelos arcillosos (0,44 meq/100gr suelo). Las relaciones de bases ((Ca+Mg)/K=62/1, Ca/Mg=7/1 y Mg/K=7/1) también estuvo dentro de los rangos críticos aceptables propuesto por Vázquez (2011) salvo la relación Ca+Mg/K (rangos críticos de 7-11/1, 3-15/1 y 2-5/1 respectivamente). El PH fue levemente ácido, pudiendo afectar el cultivo de soja. P (ppm.) presentó un coeficiente de variación elevado (32,65%) y los nutrientes en suelo el CV se ubicó entre 13 y 16%.

El número de plantas logradas estuvo dentro de los márgenes correctos sin gran variación (13%). La temperatura de hoja medida en R2 presentó escasa variación al igual que el NDVI medido en R3 (7,6 y 10,14 % respectivamente). La concentración de nutrientes en planta, medida en R3

estuvo dentro de los rangos de suficiencia para todos los nutrientes medidos, rangos de suficiencia: Nt.: 3,25-5,5; P: 0,26-0,60; K: 1,5-2,5; Mg: 0,25-1,00; Ca: 0,2-2 (IPNI). Presentaron gran variación (>20%) excepto el N.

En el caso de los componentes del rendimiento, el número de vainas por planta fue el más variable. El rendimiento presentó una media de 3943 kg/ha y CV de 30%.

En base a estos resultados, las variables de repuesta con mayor variabilidad y que por tanto se puede esperar efecto de los tratamientos y/o correlación espacial, fueron rendimiento, P en suelo, P y Ca en planta, No. vainas/planta, humedad en suelo, conductividad a 15 y 30 cm, profundidad a la que se alcanzó los 2 MPa. cm² en suelo húmedo (cm), profundidad a la que se alcanzó los 2 MPa. cm² en suelo seco, resistencia a la penetración de 0-8 cm y resistencia a la penetración de 8-20 cm.

4.2.2. Efecto promedio de la descompactación sobre la resistencia a la penetración del suelo y la respuesta vegetal

El pasaje de paraplow mostró una reducción a la resistencia a la penetración del suelo bajo las dos condiciones de humedad de suelo evaluadas (suelo húmedo y seco).

La profundidad en el perfil a la cual la resistencia a la penetración fue mayor a 2 MPa cm⁻²., fue 10 cm mayor en el tratamiento C/P, en la determinación realizada con el suelo cercano a capacidad de campo (suelo húmedo, figura No. 4).

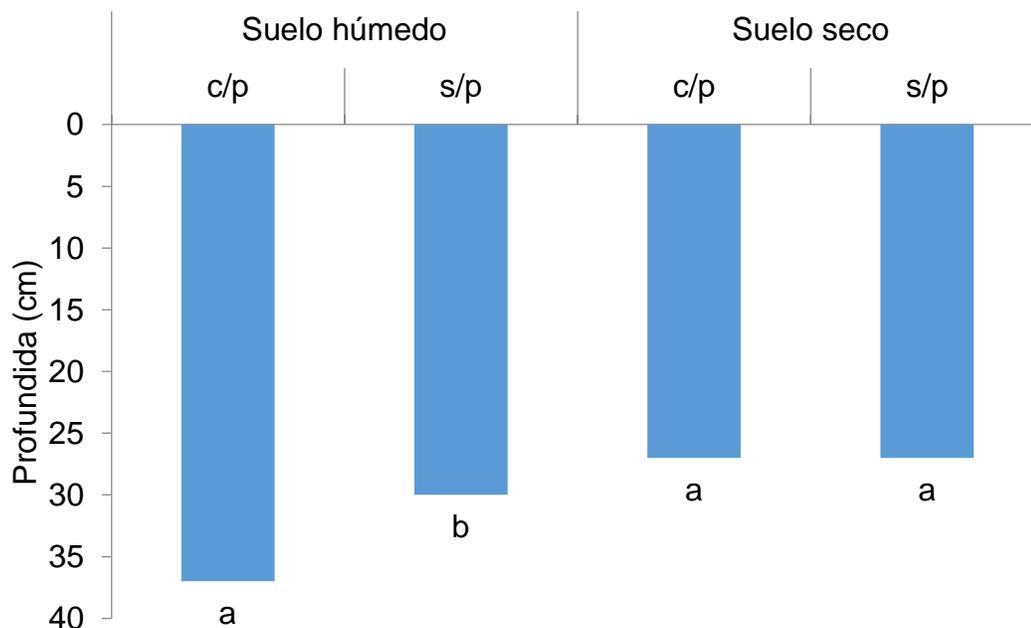


Figura No. 4. Profundidad (cm) a la cual se alcanzó una resistencia a la penetración superior a los 2 MPa./cm². Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

La profundidad a la cual se alcanzó el valor crítico definido fue significativamente mayor ($P \leq 0,05$) en suelo húmedo que en suelo seco, concordando con la bibliografía la cual menciona que la reducción de la resistencia a la penetración con el aumento de humedad del suelo se asocia a la reducción de la cohesión y ángulo de fricción interna del suelo (Ruiz et al. 2010, Jagdish et al. 2015). Con suelo seco, si bien se mantuvo la tendencia, la diferencia no fue estadísticamente significativa. Esta mayor diferencia en suelo húmedo que en seco, no concuerda con la bibliografía. Autores como como Jagdish et al. (2015) señalan lo contrario, mayores diferencias entre el suelo compactado y descompactado en suelo seco que en húmedo. Esto se puede deber a un proceso de recompactación del suelo desde el pasaje de la herramienta hasta el momento de la toma de medición en suelo seco (que fue posterior a en suelo húmedo).

Mayores profundidades con suelo descompactado implican mayor capacidad de almacenar agua disponible que en los tratamientos sin

descompactar, favoreciendo por tanto el crecimiento del cultivo de soja (Sadras et al., 2005).

El efecto de la descompactación ocurrió en todo el perfil, pero fue mayor en el estrato entre de 8 a 20cm ($p \leq 0,05$), no observándose efecto promedio de 20 a 40 cm. Los resultados evidencian problemas con el pasaje del paraplów, ya que los resultados sugieren que no siempre se logró la profundidad objetivo de 40 cm.

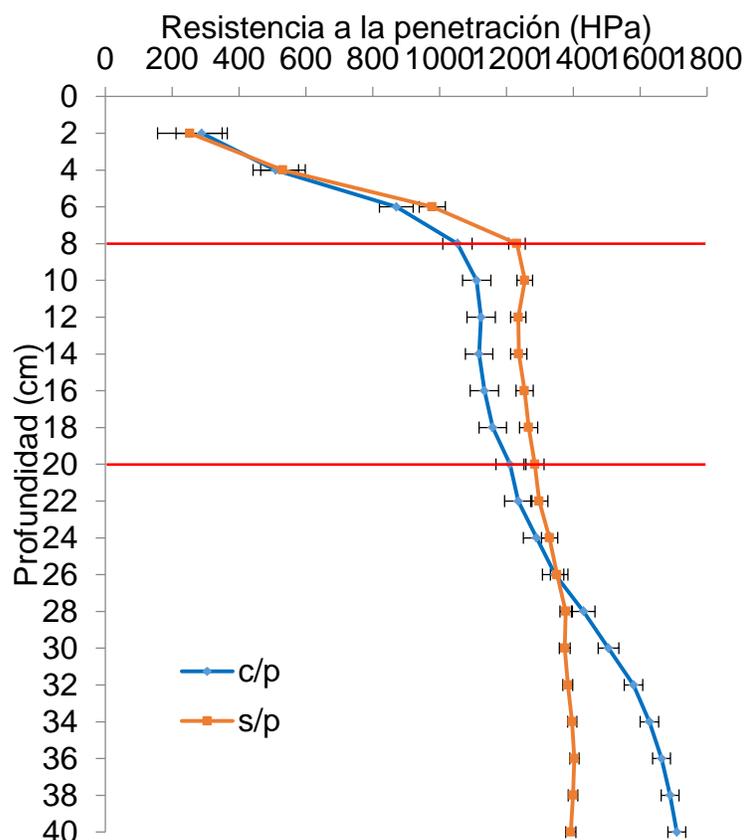


Figura No. 5. Perfil de resistencia a la penetración promedio y desvío estándar por estrato para los tratamientos descompactado y sin descompactar. Barras rojas separa los tres estratos de profundidad (superficial, medio y profundo).

La resistencia a la penetración crítica que reduce el crecimiento de las raíces de soja en 10% es de 520 HPa. (Dap. de 1,45 mg. m⁻³) y 50% con resistencia de 1450 HPa. (Dap. de 1,69 Mg. m⁻³) (Hamza y Anderson 2005,

Rosolem y Takahashi, citados por Jagdish et al. 2015), definiéndose un valor crítico de 2000 HPa. para que se afecte el 100% el crecimiento del cultivo.

Las barras de error en cada profundidad demuestran mayor coeficiente de variación en el tratamiento descompactado, lo que se explicaría por el propio trabajo de descompactación que hace la maquinaria, dejando el terreno más heterogéneo que en las fajas sin descompactar.

En los dos tratamientos la resistencia a la penetración fue cercana a 1450 HPa., por lo que si bien es probable que comiencen a existir problemas de compactación para el desarrollo radicular, estos lo afectarían en menos del 50% pero si en más al 10% (> 520 HPa.).

Las líneas horizontales en el grafico anterior separan tres intervalos de profundidad, de 0-8 cm que representan la fase superficial del suelo, de 8-20 cm donde se concentra el mayor desarrollo radicular y la fase más profunda de 20-40 cm, profundidad hasta la cual midió con el penetrógrafo.

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

Variable	n		Media		D.E.		C.V.	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Población (plantas/m ²)	52	50	39 a	36 b	3,7	5,5	46,1	44,7
Altura de planta V9 (cm)	60	60	53 a	41 b	4,9	5,5	9,1	13,4
Peso de plantas a V9 (g)	75	75	12,5 a	9,2 b	3,8	2,8	30,4	29,7
Temperatura de hoja (C°)	52	52	22,3 b	23,9 a	1,5	1,7	26,2	27,4
No. nudos/tallo	52	50	20,5 a	20 a	1,4	1,2	23,6	22,7
No. vainas/planta	52	50	44,5 a	46,3 a	8,8	12,9	62,9	89,7
NDVI.	52	51	0,72 a	0,65 b	0,04	0,07	0,8	0,8

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P \leq 0,05$).

La población obtenida, peso y altura de plantas a V9, temperatura del follaje y NDVI a R2 fueron significativamente modificadas por la descompactación. La variación de población fue dentro de un rango en el que no se espera efecto en el rendimiento, pero tanto el crecimiento del cultivo al estadio V9 como los indicadores del bienestar del cultivo a R2 (NDVI y temperatura del follaje) indican una respuesta media positiva del cultivo durante la fase vegetativa del cultivo. La altura de plantas se redujo sin modificar el número de nudos, por lo que lo que se redujo es el largo de entrenudos. Este efecto es considerado como respuesta vegetal a la compactación del suelo.

Cuadro No. 5. Variables de rendimiento para los dos tratamientos (C/P vs. S/P).

Variable	n		Media		D.E.		C.V.	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Humedad de grano	52	51	8,4 a	8,4 a	0,45	0,61	9,9	10
Peso de 100 granos (grs.)	52	50	13,2 a	13,0 b	0,5	0,6	14,3	14,3
Rendimiento corregido a 13% humedad (kg/ha)	52	51	3959 a	3925 a	1060	1308	26,8	33,3

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P \leq 0,05$).

Esta respuesta se redujo en la fase reproductiva, cuantificándose efecto significativo solamente en el peso de grano (cuadro No. 5). La variabilidad del rendimiento fue mayor para los tratamientos sin paraplow, indicando que el pasaje de la herramienta provocaría una mayor homogenización del terreno, la cual se tradujo en menor variación en rendimiento en grano (figura No. 6).

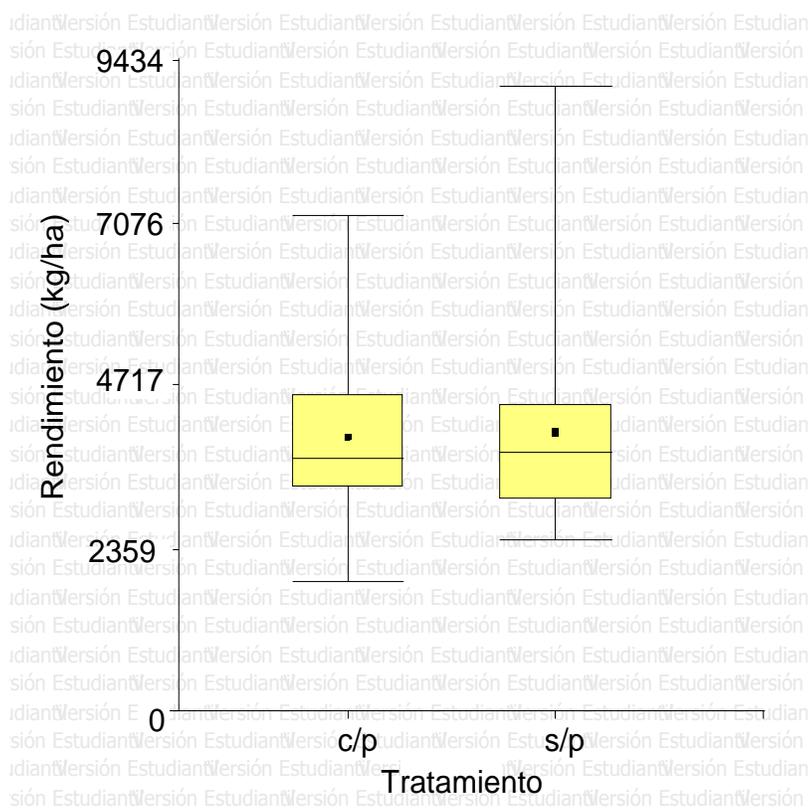


Figura No. 6. Gráfico Box-Plot de rendimiento para los tratamientos con paraplow (C/P) y sin paraplow (S/P).

Cuadro No. 6. Variables descriptivas del estado nutricional del cultivo a R2 para los dos tratamientos (C/P vs. S/P).

Variable	n		Media		D.E.		C.V.	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Nt (%)	52	52	4,93 a	4,92 a	0,3	0,3	5,3	5,4
P (%)	52	52	0,49 a	0,43 b	0,1	0,1	18,1	20,1
K (%)	52	52	1,81 a	1,58 b	0,3	0,3	17,4	17,7
Na (%)	52	52	0,04 a	0,04 a	0,04	0,04	96,8	99,1
Mg (%)	52	52	0,38 b	0,41 a	0,1	0,1	15,2	15,8
Ca (%)	52	52	1,16 a	1,23 b	0,2	0,3	20,9	23,5

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P \leq 0,05$).

La nutrición potásica, fosfatada y concentración de Ca del cultivo fueron significativamente mejor en C/P, pero la concentración de Mg fue estadísticamente menor. Por tanto, la descompactación estarían mejorando estado nutricional, por lo que haría más disponible los nutrientes para las plantas o, al desarrollar mayor sistema radicular, aumentaría la capacidad de absorción. Por tanto, el efecto no sería únicamente físico, sino químico y biológico también (Rosolem y Takahashi, citados por Jagdish et al., 2015).

4.2.3. Respuesta espacial a la descompactación y variabilidad espacial de nutrientes

4.2.3.1. Variables de suelo

En las figuras No. 7 y 8 se presenta la respuesta espacial a la descompactación cuantificada en el suelo y en el cultivo, respectivamente.

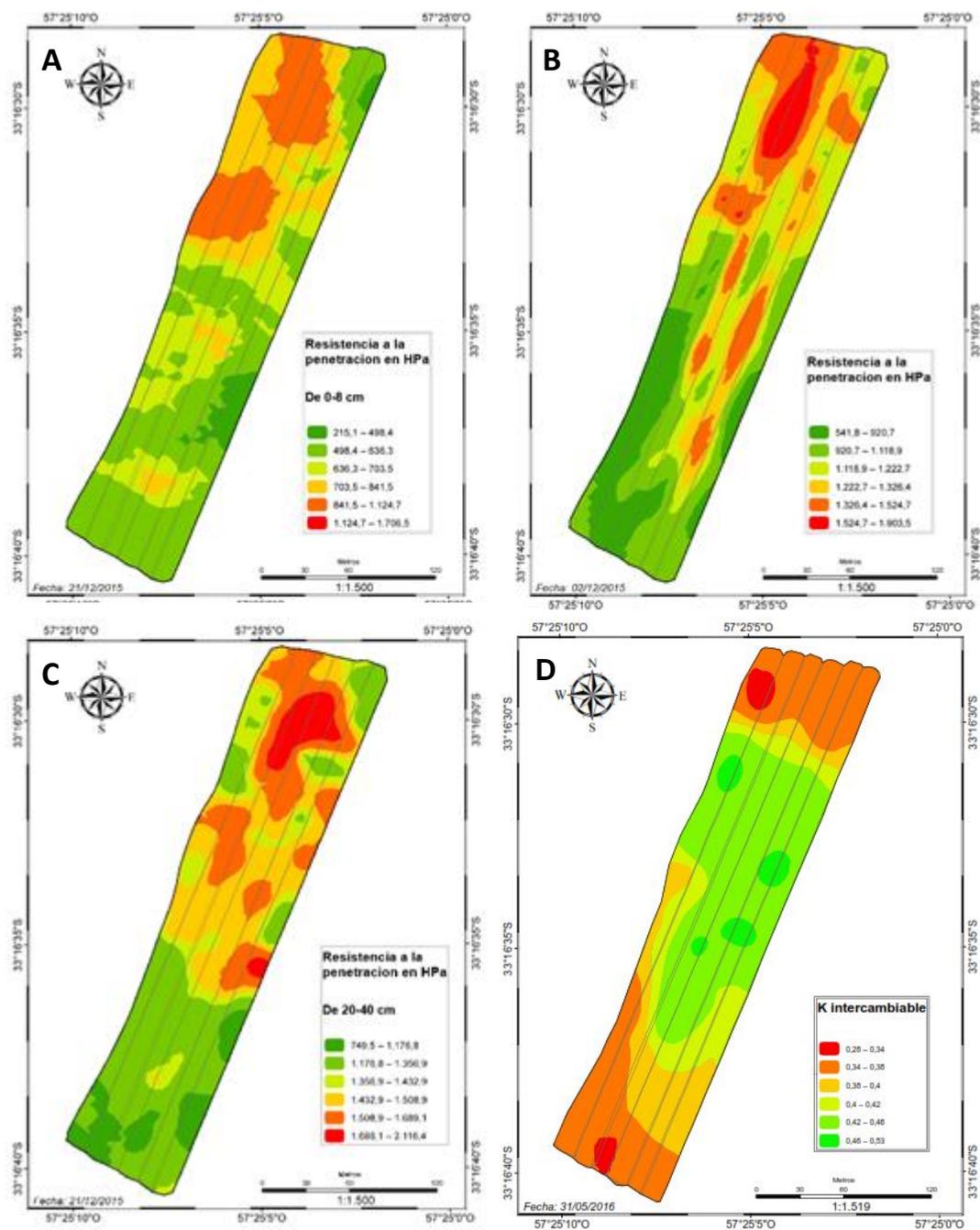


Figura No. 7. Mapas variables en suelo resistencia de 0-8 (A), de 8-20 (B), de 20-40 (C) y K intercambiable (D).

Superficialmente no se observó un claro efecto del paraplow, manifestándose una zona más compactada (noroeste) y otra menos compactada (sureste).

Subsuperficialmente, donde la actividad radicular es muy importante, la acción del paraplow fue más clara que en la superficie, manteniéndose la ubicación espacial de las zonas de mayor y menor compactación, pero aparecieron lugares con un claro efecto del paraplow, que se visualizan como fajas longitudinales, en la dirección en la que se pasó la herramienta. Este efecto se observa más claramente en la zona media del ensayo.

Más profundamente, por debajo de los 20 cm, el efecto de la herramienta fue menos evidente. Apareció nuevamente la zona noreste del ensayo con un nivel de compactación mayor que la zona sureste, notoriamente menos descompactada y la zona media del ensayo, con valores de resistencia a la penetración medios.

El K intercambiable presentó mayores niveles en la zona central del ensayo, obteniéndose valores bajos en los extremos del mismo, incluso por debajo del nivel crítico para el cultivo de soja.

4.2.3.2. Respuesta vegetal

Con el cultivo en el estadio R2 (12 de febrero) iniciándose lo que se transformó en un déficit hídrico progresivo, se cuantificaron diferencias en el Índice de vegetación normalizada (figura No. 7, B). Las diferencias entre tratamientos fueron notorias, visualizándose en forma clara las fajas correspondientes a los tratamientos de descompactación. Si bien existieron zonas con valores mayores y menores niveles de NDVI, el pasaje de la herramienta tendió a aumentar los valores, principalmente en las zonas donde el NDVI del testigo fue más bajo.

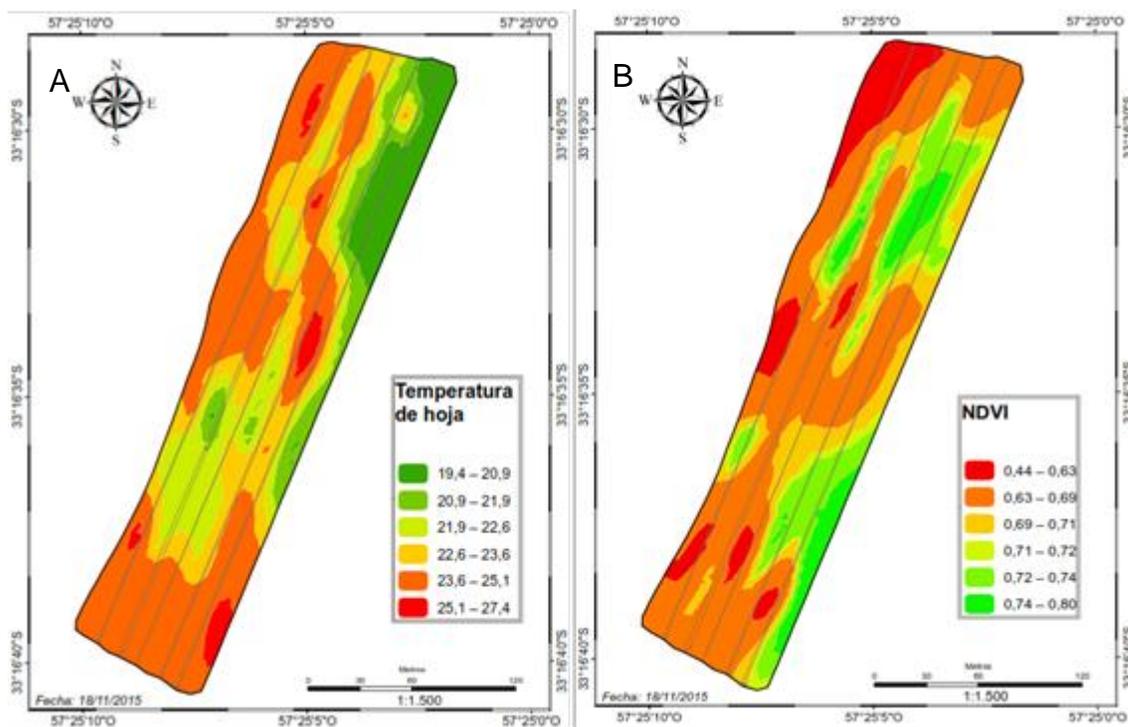


Figura No. 8. Mapas de variables en planta temperatura en planta (A) y NDVI (B).

El hecho que en las fajas con paraplow el cultivo de soja tuviera un mayor NDVI, indicaría que la descompactación permitió un mayor crecimiento del cultivo, por lo menos hasta comienzo de la etapa reproductiva (R2). En la misma fecha, la menor temperatura del follaje del follaje (figura No. 8, A) también estaría indicando que el estado hídrico del cultivo a ese estadio era mejor en los tratamientos descompactados.

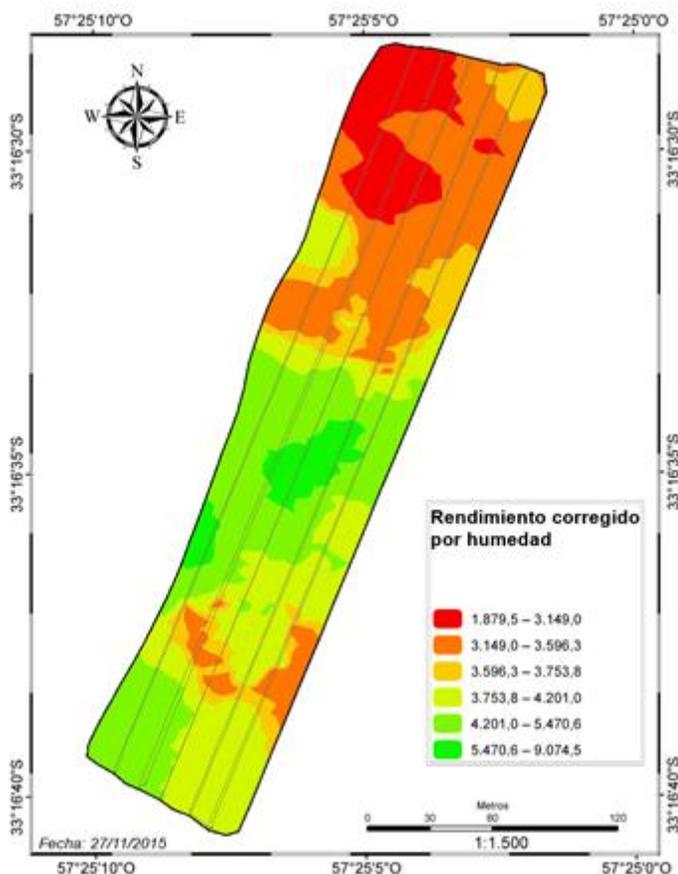


Figura No. 9. Mapa de rendimiento (kg/ha base 13%), promedio de cada punto de muestreo.

En la figura No. 9 se muestra el mapa interpolado de rendimiento en grano. Si bien se identificaron 3 zonas (terciles de rendimiento) diferentes, no se identificaron fajas de rendimiento diferencial correspondientes con los tratamientos.

La zona noreste, donde el suelo estaba más compactado y presentaba menor humedad en superficie, resultó en menores rendimientos.

4.2.4. Relación entre rendimiento de grano y resistencia penetración del suelo

En las figuras No. 10 y 11 se muestra la relación entre rendimiento de soja y la profundidad en el perfil del suelo a la cual se alcanzó una resistencia a la penetración de 2000 HPa. cm^{-2} y con la resistencia a la penetración promedio del estrato entre 8-20 cm de profundidad respectivamente; donde la relación no es significativa.

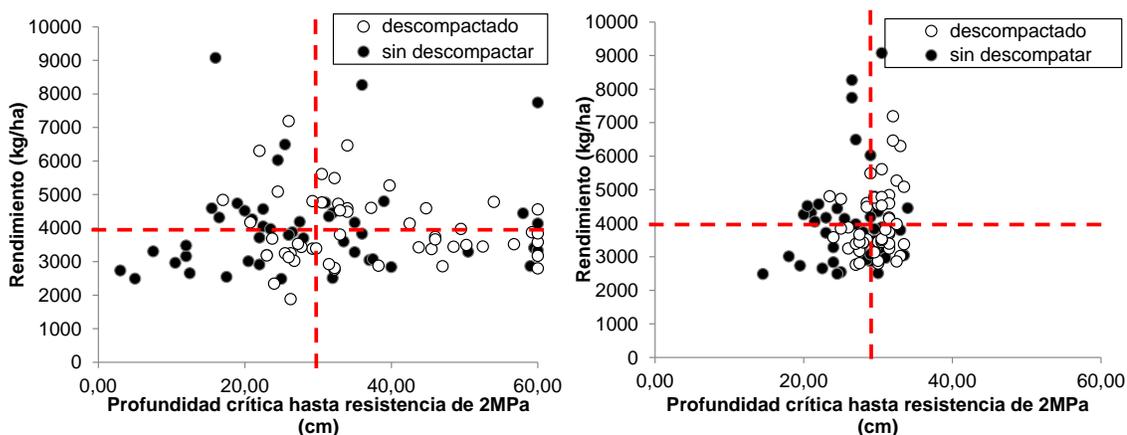


Figura No. 10. Relación entre rendimiento y profundidad crítica de resistencia a la penetración hasta los 2000 HPa., medida con penetrómetro para suelo húmedo (izquierda) y seco (derecha), de cada punto de muestreo para los tratamientos con y sin paraplow. Las líneas rojas punteadas dividen los gráficos en 4 cuadrantes, la línea horizontal es el rendimiento promedio de la chacra (4000 kg/ha) y la vertical la profundidad crítica promedio.

El cuadrante inferior izquierdo corresponde a los rendimientos más bajos y menor profundidad hasta el valor crítico de resistencia a la penetración. La mayoría de los puntos corresponden al tratamiento sin descompactar. El cuadrante opuesto (superior a la derecha), corresponde a los rendimientos más altos y mayor profundidad, encontrándose muy pocos puntos del tratamiento sin descompactar.

En suelo húmedo el rango de profundidad hasta la resistencia crítica fue mayor que en suelo seco, situación en la cual los valores tendieron a concentrarse entorno a los 30 cm de profundidad. Por tanto, se perdió la relación con rendimiento.

Si bien la dispersión de los puntos es grande, la tendencia concordaría con los estudios anteriores, evidenciando que la resistencia a la penetración, vista a través de la profundidad crítica de resistencia, afectaría negativamente el rendimiento del cultivo de soja. La gran dispersión de los puntos evidenciaría que la compactación del suelo no fue la variable principal en determinar el rendimiento del cultivo.

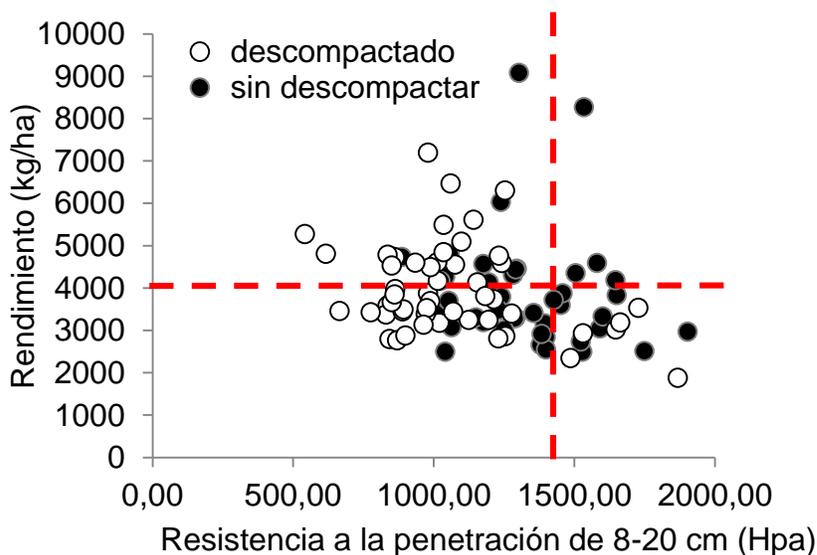


Figura No. 11. Rendimiento en relación a la resistencia a la penetración de 8-20 cm para los tratamientos con y sin paraplow. Las líneas rojas punteadas dividen los gráficos en 4 cuadrantes, la línea horizontal es el rendimiento promedio de la chacra (4000 kg/ha) y la vertical la profundidad crítica citada por la bibliografía donde se reduce en 50% el crecimiento del cultivo (1450 HPa.).

A partir de 1400-1450 Hpa. de resistencia a la penetración en el estrato 8-20cm de profundidad los rendimientos de soja fueron menores, coincidiendo con mayor cantidad de puntos del tratamiento S/P. No fueron registrados valores por encima de los 2000 Hpa., a partir del cual según la bibliografía el crecimiento se detendría.

4.2.4. Comportamiento del suelo y del cultivo según zonas diferenciadas por compactación entre 8-20 cm de profundidad

En la figura No. 12 se presentan las zonas identificada por terciles de compactación del suelo en el estrato 8-20 cm de profundidad

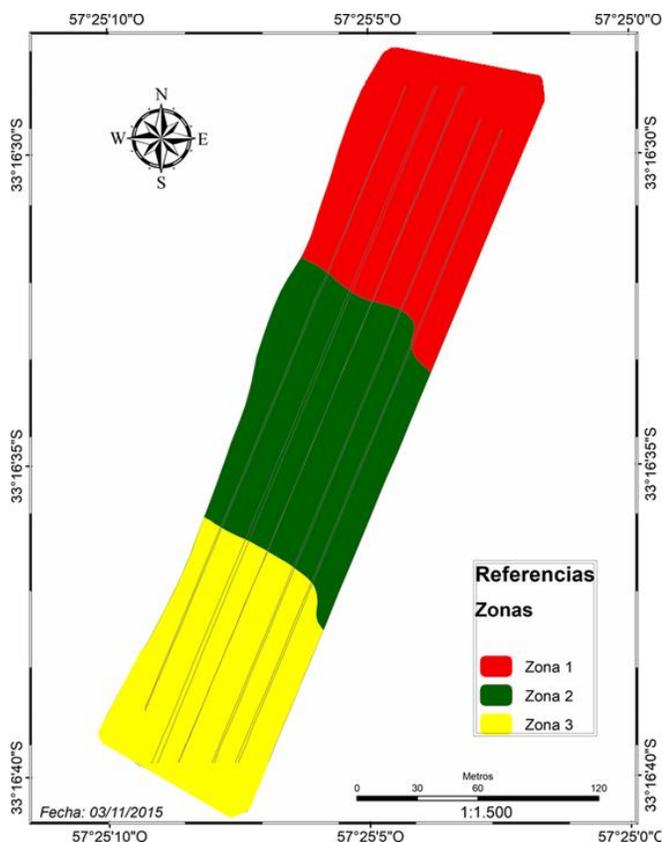


Figura No. 12. Mapa de zonificación definida en terciles de resistencia a la penetración del suelo en el estrato 8-20cm de profundidad.

La zona 1 generó los rendimientos promedios más bajos (cuadro No. 11), es la zona identificada inicialmente como más compactada (tratamientos sin paraplow) y que el pasaje de la herramienta de descompactación no produjo una reducción significativa en la resistencia a la penetración (1347 Hpa. promedio).

La zona 2 logró los rendimientos promedios más elevados (4485 kg/ha promedio). En esta zona los tratamientos sin paraplow tuvieron una resistencia a la penetración similar a los de la zona 1. Si bien con paraplow los niveles de

resistencia a la penetración fueron inferiores, no se reflejaron en una respuesta positiva en el rendimiento del cultivo.

La zona 3, resistencia a la penetración del suelo del testigo sin paraplow fue menor, el pasaje de paraplow no tuvo efecto significativo en esta zona y por tanto, tampoco hubo respuesta en rendimiento.

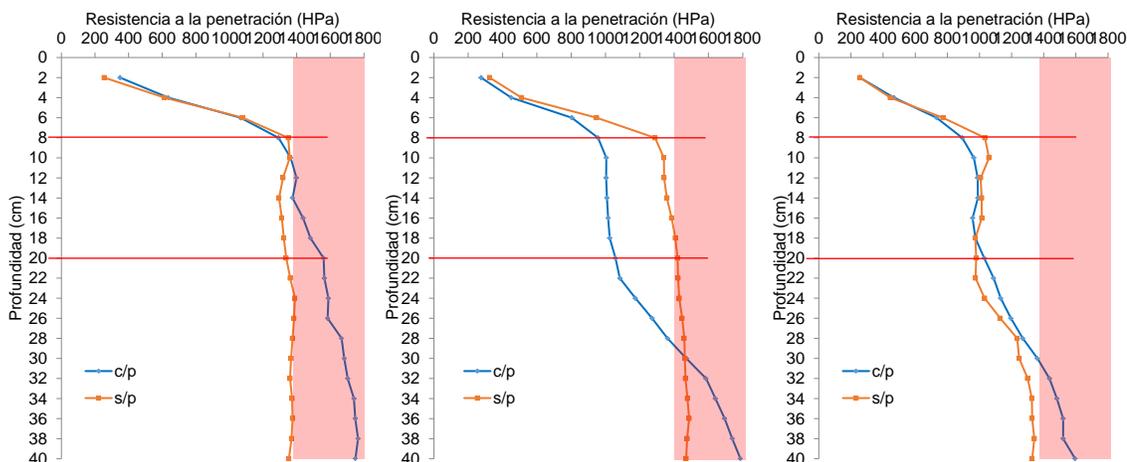


Figura No. 13. Perfiles de resistencia a la penetración para las tres zonas.

Izquierda: zona 1=alta-alta; centro: zona 2= alta-baja; derecha: zona 3= baja-baja

Al realizar los perfiles de resistencia a la penetración para las tres zonas de respuesta diferencial se observa claramente el diferente efecto que realizó el paraplow. Las franjas rojas indican las zonas críticas de resistencia a la penetración donde comienza a afectar el crecimiento del cultivo (1450 HPa.cm^{-2}) por reducir el crecimiento radicular en un 50% (Jagdish et al. 2015).

En la zona 1 las fajas imperturbadas se encontraron sobre el límite de resistencia crítica donde comenzaría a afectarse el crecimiento vegetal. El pasaje de la herramienta no descompactó el suelo, incluso a partir de los 10 cm de profundidad se registraron valores de resistencia mayores. No hay una explicación clara para el hecho que la herramienta no haya cumplido el trabajo de descompactar. Esta zona estaba en un nivel alto de compactación, con valores de resistencia entre 1,6 y 2,0 MPa cm^{-2} , a lo que su sumó deficiencia de K (cuadro No. 9) y bajo contenido de humedad en superficie (cuadro No. 7); Posiblemente el trabajo no se realizó a la profundidad objetivo. A su vez, esa zona es topográficamente más baja, ubicada sobre una terraza de desagüe, por

lo que el tráfico de maquinaria podría ser otra posible explicación a esta recompactación. El efecto fue de muy corto plazo, ya que luego de cuatro meses, que corresponde al pasaje del paraplow hasta la siembra, se volvió a una condición pero que la original. Este proceso se acelera en suelos con pobres características físicas y químicas.

En la zona 2, el efecto del paraplow fue muy marcado, llevando el suelo a valores de resistencia muy por debajo de los críticos hasta los 30 cm. Las fajas sin paraplow presentaron valores de resistencia iniciales similares a los de la zona 1, pero en cambio el pasaje de la herramienta mantuvo su efecto hasta la siembra. El efecto encontrado dentro de esta zona se podría atribuir a que las condiciones físicas del suelo no eran tan limitantes y la profundidad del mismo sea mayor que la zona 1. A su vez también está asociado a un desagüe dentro de la chacra lo cual implica que el suelo permanezca más húmedo por un periodo más largo de tiempo.

Por último, la zona 3, presenta características diferentes en cuanto a resistencia a la penetración inicial. Las fajas sin paraplow, presentan valores de resistencia (1106,4 HPa. de 8-20cm) por debajo del crítico para el crecimiento del cultivo y el pasaje de la herramienta no produjo ningún cambio (959,1 HPa. de 8-20cm). Por lo tanto es una zona la cual no presentaría problemas de compactación.

Las características propias del suelo de las tres zonas son muy contrastantes, lo que explicaría la condición de origen y la respuesta diferencial al pasaje de la herramienta (cuadro No. 8).

Cuadro No. 7. Características descriptivas del suelo, por zona de respuesta a la descompactación.

Variable	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Humedad superficial	28 c	39 b	30 c	42 ab	32 c	46 a
Conductividad 15 cm	795 bc	862 bc	719 c	888 b	1187 a	1255 a
Conductividad 30 cm	1203 bc	1192 c	1225 bc	1218 bc	1472 a	1395 ab
Profundidad a la que se alcanzó los 2 MPa. cm ² en suelo húmedo (cm)	30 bc	26 c	38 ab	34 bc	45 a	28 c
Profundidad a la que se alcanzó los 2 MPa. cm ² en suelo seco (cm)	23 c	28 ab	30 a	28 ab	29 a	25 bc
Resistencia a la penetración de 0-8 cm (HPa.)	814 a	826 a	618 b	827 a	586 b	653 ab
Resistencia a la penetración de 8-20 cm (HPa.)	1315 a	1378 a	960 b	1373 a	959 b	1106 b
Resistencia a la penetración de 20-40cm (HPa.)	1590 a	1491 ab	1407 bc	1458 ab	1200 d	1276 cd

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

Para humedad superficial del suelo en el momento de cuantificar la resistencia a la penetración fue diferente entre tratamientos en las tres zonas, presentando mayor contenido de humedad promedio los tratamientos sin paraplow. La zona 2 y 3 presentaron valores de humedad levemente mayores en general que la zona 1. En cuanto a conductividad eléctrica, las mayores diferencias entre tratamientos están en la zona 2 a 15 cm y entre zonas, la zona 3 presenta mayores valores en general que las otras dos zonas a 15 y 30 cm.

Cuadro No. 8. Respuesta del cultivo a la descompactación según zona.

Variable	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Población	39 a	37 a	39 a	37 a	38 a	33 b

Nudo/tallo principal	20 ab	19 b	21 a	20 a	21 a	21 a
Vaina/planta	38 c	39 bc	48 a	49 a	45 ab	52 a
Peso de 100 granos	13,1 b	13,0 bc	13,5 a	13,2 ab	13 bc	12,8 c
Temperatura de hoja	21,6 b	23,4 a	22,3 b	24,0 a	23,4 a	24,1 a
Índice verde normalizado (NDVI)	0,73 a	0,65 b	0,71 a	0,66 b	0,72 a	0,64 b

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

En ninguna de las tres zonas hubo diferencias significativas en implantación ni en los componentes del rendimiento, existiendo sólo tendencias a mayor peso de 100 granos en los tratamientos descompactados; y mayor número de vainas en los tratamientos sin descompactar en la zona 1 y 3.

Temperatura de hoja en zona 1 y 2 los tratamientos con paraplow presentaron menores valores que los sin paraplow. Para NDVI en las tres zonas hubo respuesta significativa al pasaje de paraplow.

El pasaje de la herramienta, no incidió en la implantación del cultivo pero sí produjo diferencias notorias durante el crecimiento vegetativo del mismo en las tres zonas de respuesta diferencial (hasta R2), pero no se concretaron en respuesta en los componentes del rendimiento del cultivo de soja.

Cuadro No. 9. Propiedades químicas en suelo a 7,5 y 15 cm de profundidad por zonas.

Nutrientes en suelo (prof. 7,5 cm)	Zona 1	Zona 2	Zona 3
p(ppm)	19,2 a	19,1 a	20,4 a
K (meq/100gr suelo)	0,43 b	0,47 a	0,40 b
Na(meq/100gr suelo)	0,1 a	0,1 a	0,1 a
Mg(meq/100gr suelo)	3,1 b	3,5 a	3,3 ab
Ca(meq/100gr suelo)	25,2 a	23,1 a	23,8 a
MO (%)	5,3 a	5,4 a	5,4 a
Ph H ₂ O	5,7 a	5,6 b	5,5 b
Ph KCl	4,6 a	4,5 ab	4,4 b
Nutrientes en suelo (prof. 15 cm)			
P(ppm)	6,0 a	6,3 a	5,6 a
K (meq/100gr suelo)	0,4 ab	0,4 a	0,4 b
Na(meq/100gr suelo)	0,1 a	0,1 a	0,1 a
Mg(meq/100gr suelo)	2,9 b	2,3 a	3,0 b
Ca(meq/100gr suelo)	29,4 a	25,2 b	26,6 b
MO (%)	4,4 a	4,5 ab	4,6 a
Ph H ₂ O	6,1 a	5,8 a	5,8 a
Ph KCl	5,0 a	4,7 a	4,7 a

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

La zona 2 tuvo mayor disponibilidad de K y Mg que la 1 y 3, tanto a 7.5 como a 15 cm de profundidad. En PH a 7.5 cm fue más ácido en la zona 2 y 3 que en la 1. Para el resto de los nutrientes en suelo no hubo diferencias significativas entre zonas.

Cuadro No. 10 Nutrientes en planta por zonas

Nutrientes en planta	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	c/p	s/p	c/p	s/p	c/p	s/p
Nt(%)	4,86 a	4,87 a	4,92 a	4,92 a	5,0 a	4,97 a
P(%)	0,48 a	0,42 bc	0,51 a	0,42 c	0,48 ab	0,46 abc
K (%)	1,83 ab	1,63 bcd	1,86 a	1,62 cd	1,71 abc	1,46 d
Na(%)	0,04 ab	0,04 a	0,04 ab	0,05 a	0,03 b	0,04 ab
Mg(%)	0,40 ab	0,45 a	0,37 b	0,40 b	0,36 b	0,38 b
Ca(%)	1,24 ab	1,31 a	1,10 b	1,22 ab	1,14 ab	1,16 ab

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

El muestreo de hojas se realizó en el estadio R2 del cultivo, hasta este momento el cultivo se encontraba en óptimas condiciones de crecimiento.

P y K presentaron mayores valores en los tratamientos C/P para las tres zonas. El resto de los nutrientes evaluados no presentaron diferencias. Para P las diferencias entre tratamientos fueron mayores en la zona 2 (0,9% de diferencia) que en la 1 y 3 (0,6% y 0,2% respectivamente). En K las diferencias entre tratamientos fueron importantes en las tres zonas.

Para el K esto se debería a que cuando se realiza el movimiento sub-superficial del suelo se rompen las arcillas por lo tanto se libera K que se encuentra en las capas más externas de dichos agregados arcillosos y las plantas pueden acceder a mayor cantidad más fácilmente.

Las diferencias en contenido de nutrientes en el suelo entre las zonas no incidieron en el estado nutricional del cultivo, ya que las diferencias encontradas en planta ocurrieron entre tratamientos más que entre zonas.

Si los tratamientos C/P están en mejor estado nutricional deberían rendir más, esto no fue así por lo que otra limitante afectó en mayor medida (estrés hídrico).

Cuadro No. 11. Rendimiento en grano de soja (kg ha⁻¹) por zonas

Variable	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	C/P	S/P	C/P	S/P	C/P	S/P
Rendimiento	3211 c	3361 bc	4581 a	4399 a	3843 abc	4205 ab
	3286,52 b		4490,53 a		3847,54 ab	

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

La zona 2, en la que en base a la respuesta a la descompactación cuantificada en resistencia a la penetración del suelo se esperaba una respuesta significativa del cultivo, sólo se cuantificó una tendencia. La zona 1 y 3 no presentaron diferencias en rendimiento.

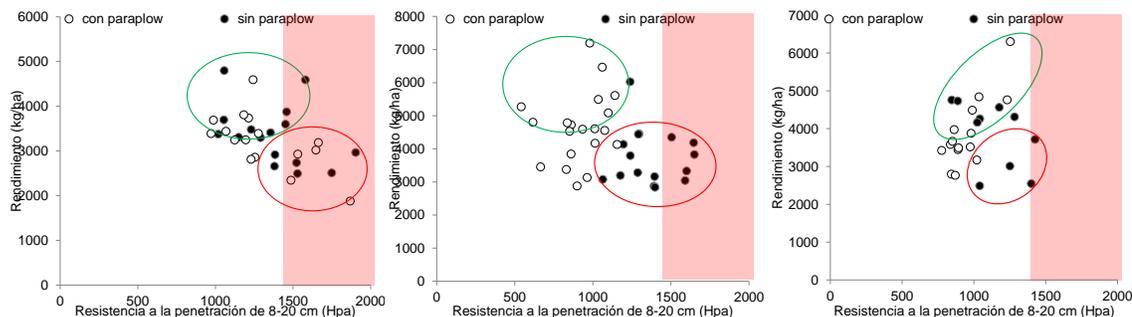


Figura No. 14. Diagrama de dispersión de puntos para rendimiento vs resistencia para las 3 zonas

Al relacionar el rendimiento de soja con la resistencia a la penetración punto a punto para cada zona, es posible identificar un comportamiento diferencial (figura No. 14).

Para la zona 1, de rendimientos más bajos existió una tendencia a mayores rendimientos a menor resistencia a la penetración, tendencia que no separa claramente entre los tratamientos, por lo que tiene un componente aleatorio en el terreno.

Lo mismo en la zona 2, de mayores rendimientos en general. El efecto positivo de la herramienta de descompactación, produjo un incremento en los rendimientos que, si bien no fue estadísticamente diferente, marcó una tendencia, separándose dos nubes de puntos. Esta zona podría haber acumulado más agua en el período de crecimiento vegetativo por lo que al analizar el efecto tratamiento las diferencias son más claras.

La zona 3, de rendimientos intermedios entre las otras dos zonas; no se observa una separación clara entre tratamientos, aunque si los mayores rendimientos corresponden a los tratamientos descompactados y los menores a los tratamientos sin paraplow.

5. CONCLUSIONES

Se logró identificar zonas con compactación diferencial dentro del área experimental, por lo que hay evidencia que permite aceptar la hipótesis planteada sobre la existencia de zonas de la chacra con compactación diferencial, que es posible identificarlas y mapearlas.

El mayor efecto que realizó el parapló, fue medido a través de mayor humedad superficial en el suelo, mayor profundidad a la cual se alcanzó los 2000 HPa cm⁻² de fuerza en suelo húmedo y la resistencia a la penetración en los estratos 0-8 cm y de 8-20 cm. El cultivo respondió a estas diferencias generadas en el suelo hasta los estadios reproductivos iniciales (R2-R3), reflejándose en mayor implantación, altura de planta, NDVI y temperatura de hoja.

Con relación a la hipótesis sobre respuesta diferencial del cultivo a las descompactación sub-superficial de las zonas identificadas, se manifestó de manera significativa hasta el estadio R2, pero esto no se manifestó en rendimiento. Las características hídricas del año y la plasticidad reproductiva del cultivo serían las causas de este comportamiento, haciendo necesario disponer de información de distintos años y ambientes para confirmar o no las tendencias cuantificadas en este trabajo.

Las diferencias mencionadas anteriormente, se establecieron en mayor medida en ciertas zonas más que en otras, lográndose identificar tres zonas de comportamiento diferencial frente al pasaje de la herramienta.

La zona uno, de propiedades físicas y químicas más limitantes; los valores de resistencia a la penetración fueron altos (sobre límite crítico de resistencia) y el pasaje del parapló no logró descompactar el suelo o el proceso de recompactación fue de tal forma que 4 meses luego de pasar la herramienta las fajas descompactadas se recompactaron (incluso más que las testigos).

La zona dos presentaba valores de resistencia similares a la zona uno y el pasaje de la herramienta logró descompactar el suelo; hubo respuesta significativa del cultivo hasta R2, no reflejándose posteriormente en rendimiento.

Para el caso de la zona tres, no presentó problemas de compactación previo al pasaje de la herramienta por lo que no hubo respuesta al pasaje del paraplow.

6. RESUMEN

Los sucesivos años de agricultura continua sin laboreo, con bajo aporte de los residuos de cosecha y pasaje de maquinaria han generado problemas de compactación en el suelo que afectan los rendimientos de los cultivos. La compactación no es homogénea dentro de la chacra, siendo posible identificar zonas en las cuales el cultivo responde diferente. Por lo que el pasaje de una herramienta de descompactación sub-superficial surge como alternativa. Este trabajo trató de identificar zonas de la chacra con compactación diferencial; estudiar la respuesta el cultivo de soja al descompactar el suelo y las variables que la explican. El paraplow descompactó el suelo significativamente en zonas con compactación media. En suelo húmedo la diferencia entre tratamientos fue mayor que en suelo seco. El cultivo presentó diferencias hasta inicio de floración en temperatura, color de hoja y altura de planta, pero no modificó el rendimiento. Se identificaron zonas en diferente grado de compactación, en base a la resistencia a la penetración en el estrato de 8-20 cm. Existió respuesta significativa del cultivo hasta floración, reflejándose en mayor implantación, mayores índices del color, menor temperatura de hoja y mayor altura de planta lo que no se tradujo en rendimiento, posiblemente como consecuencia de la falta de lluvias durante la etapa más crítica, donde se determina el rendimiento.

Palabras clave: Compactación; Paraplow; Soja.

7. SUMMARY

Successive years of continuous no-till agriculture, low input crop residues and passage of machinery have caused problems in the soil compaction that affect crop yields. Compaction is inhomogeneous within the farm, being possible to identify areas where the crop responds differently. So the passage of a tool of till subsurface emerges as an alternative. This study sought to identify areas of the farm with differential compaction; study the response soybean cultivation to loosen the soil and the variables that explain it. The paraplow ripping the soil in areas with average compaction. Wet soil treatment difference was greater than in dry soil. The culture showed differences to start flowering in temperature, leaf color and plant height, but did not change the performance. It was identified areas in different compactness, based on resistance in the stratum penetration 8-20 cm. There was significant crop response to flowering, reflecting increased deployment, higher levels of color temperature lower sheet and greater plant height which did not translate into performance, possibly due to the lack of rain during the most critical stage, where the yield is determined.

Keywords: Compaction; Paraplow; Soybean.

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. Álvarez, C. R.; Taboada, M. Á.; Bustingorri, C.; Gutiérrez Boem, F.; Flavio, H. 2006. Descompactación de suelos en siembra directa; efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Revista Ciencia del Suelo*. 24 (1): 1-11.
3. _____; 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. *Revista Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27(2): 159-169.
4. _____. 2012. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. Tesis PhD. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Área Ciencias Agropecuarias. 193 p.
5. _____, Taboada, M. A.; Perelman, S.; Morrás, H. J. M. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Research*. 52: 533–542.
6. Bai, Z. G.; Dent, D. L.; Olsson, L.; Schaepman, M. E. 2008. Global assessment of land degradation and improvement .1. Identification by remote sensing, Report 01. (en línea). Wageningen, The Netherlands, ISRIC (World Soil Information). 69 p. Consultado el 7 de oct. 2015. Disponible en http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/Report%202008_01_GLADA%20international_REV_Nov%202008.pdf
7. Bakker, D. M.; Davis, R. J. 1995. Soil deformation observations in a Vertisol under field traffic. *Australian Journal of Soil and Tillage Research*. 33: 817–832.

8. Balbuena, R. H.; Terminiello, A. M.; Claverie, J. A.; Casado, J. P.; Marlats, R. 2000. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. (en línea). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 4 (3): 453-459. Consultado 2 oct. 2015. Disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S141543662000000300023&script=sci_arttext. 4: 453-59.
9. Bateman, J. C.; Chanasyk, D. S. 2001. Effects of deep ripping and organic matter amendments on Ap horizons of soil reconstructed after coal strip-mining. *Canadian Journal of Soil Science*. 8: 113–120.
10. Best, S.; León, L. 2006. Geoestadística. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 147-161.
11. Bingham, I. J. 2001. Soil–root–canopy interactions. *Annals of Applied Biology*. 138: 243–251.
12. 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 (Clycine max (L.) Merrick). *Soil and Tillage Research*. 78: 53-58.
13. Calonego, J. C.; Rosolem, C. A. 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *European Journal Agronomy*. 33: 242–249.
14. Chamen, W. C. T.; Moxey, A. P.; Towers, W.; Balana, B.; Hallett, P. D. 2015. Mitigating arable soil compaction; a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*. 146: 10–25.
15. Correndo, A. A.; García, F. O. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico; cultivos extensivos. *IPNI Cono Sur*. no. 14: s.p.
16. Donkor, N. T.; Gedir, J. V.; Hudson, R. J.; Bork, E. W.; Chanasyk, D. S.; Naeth, M. A. 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*. 82: 1–8.

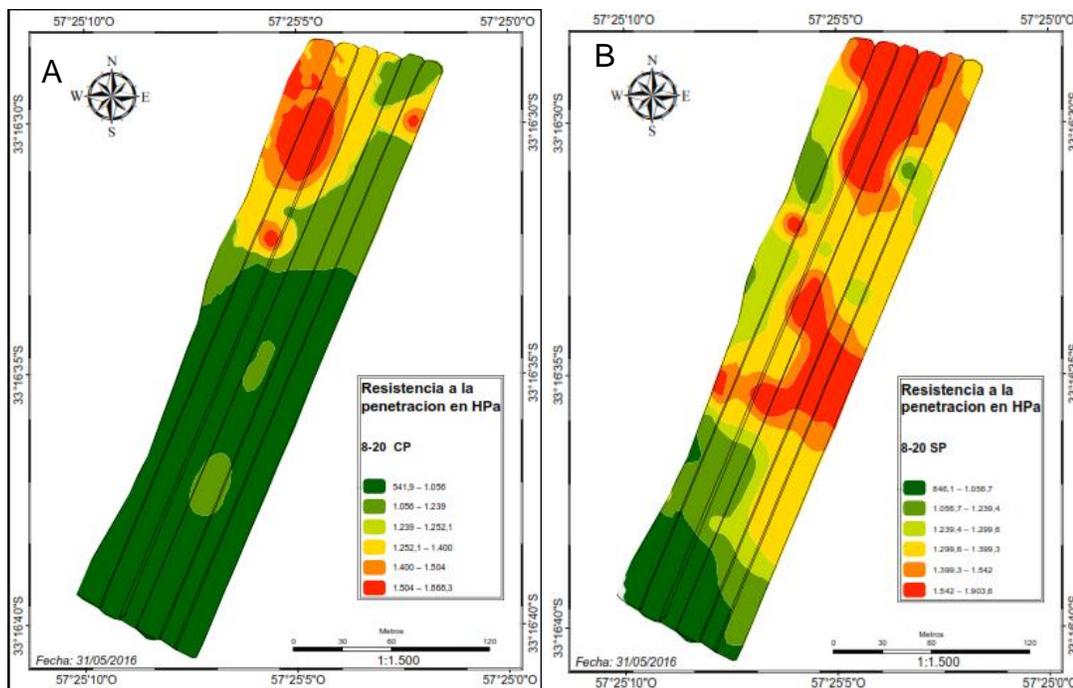
17. Ellies Sch, A.; Smith, R. R.; Jose Dorner, F. J.; Proschle, T. A. 2000. Effect of moisture and transit frequency on stress distribution on different soils. *Agro Sur*. 28: 60–68.
18. Elissondo, E.; Costa, J. L.; Suero, E.; Fabrizzi, K. P.; García, F. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Revista Ciencia del Suelo*. 19 (1): 11-20.
19. Ernst, O.; Siri-Prieto, G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality Indicators. *Soil and Tillage Research*. 105: 260–268.
20. Fernández, P. L.; Álvarez, C. R.; Taboada, M. A. 2015. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop–livestock systems of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 153: 86-94.
21. Flowers, M.; Lal, R. 1998. Axle load and tillage effect on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil and Tillage Research*. 48: 21–35.
22. Grzesiak, M. T. 2009. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. *Plant Root*. 3: 10-16.
23. Gupta, S. C.; Allmaras, R. R. 1987. Models to asses the susceptibility of soils to excessive compaction. *In*: Stewart, B. A. ed. *Advances on soil science*. New York, Springer-Verlag. v.6, pp. 65-100.
24. Hakansson, I.; Voorhees, W. B.; Riley, H. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research*. 11: 239-282.
25. Hamza, M. A.; Anderson, W. K. 2002. Improving soil physical fertility and crop yield on a clay soil in western Australia. *Australian Journal Agriculture Res*. 53: 615–620.
26. _____; _____. 2005. Soil compaction in cropping systems, a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 82: 121–145.

27. 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.
28. Johnson, C. E.; Bailey, A. C. 2002. Soil compaction. *In*: Stewart, B. A. ed. *Advances on soil science*. New York, Springer-Verlag. v. 2, pp. 155-178.
29. Jorajuría, D.; Draghi, L. 2000. Sobrecompactacion del suelo agrícola. Parte I; influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 4: 445–452.
30. _____. 2014. Compactación por tráfico en sistemas de agricultura continúa sin laboreo. *In*: Congreso de la SUCS (1º. 2014. Colonia, UY). Trabajos presentados. Colonia, s.e. pp. 1-7.
31. Jornada Técnica (2010, Mercedes, Uruguay). 2010. El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Montevideo, INIA. 45 p. (Actividades de Difusión no. 605).
32. Keller, T.; Arvidsson, A. J.; Dawidowski, J. B.; Koolen, A. J. 2004. Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil and Tillage Research*. 77: 97–108.
33. Kingwell, R.; Fuchsbichler, A. 2011. The whole-farm benefits of controlled traffic farming; an Australian appraisal. *Agricultural Systems*. 104: 513–521.
34. Martino, D. L. 1997. Siembra directa en los sistemas agrícola-ganaderos del litoral. Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 82).
35. _____. 2003. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. (en línea). Montevideo, INIA. GRAS. pp. 225-227. Consultado 23 abr. 2015. Disponible en http://www.inia.org.uy/siembra/daniel_martino.pdf
36. Medvedev, V. V.; Cybulko, W. G. 1995. Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil and Tillage Research*. 36: 153–164.

37. 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 5 jul. 2015. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat>
38. Oliver, M. A.; Webster, R. 2013. A tutorial guide to geostatistics; computing and modelling variograms and kriging. *Catena*. 113: 56–69.
39. Richard, G.; Cousin, I.; Sillon, J. F.; Bruand, A.; Guerif, J. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil; influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal Soil Science*. 52: 49-58.
40. Ruiz, I. G.; Sánchez Ortiz, M.; Vidal Díaz, M. L.; Betancourt Rodríguez, Y.; Rosa Llano, J. 2010. Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. *Revista Ciencia del Suelo*. 19 (2): 51-56.
41. 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.
42. Sanzano, G. A.; Hernández, C.; Morandini, M.; Sosa, F.; Rojas Quinteros, H.; Sotomayor, C.; Romero, J. 2012. Evaluación de la compactación de suelos en siembra directa en la Llanura Chacopampeana de la provincia de Tucumán, Rep. Argentina. *Revista Industrial y Agrícola*. 28 (1): 1-12.
43. Taboada, M. A. 2003. Cambios en el suelo, asociados al tránsito y pisoteo de la hacienda. Buenos Aires, UBA. Facultad de Agronomía. s.p.
44. Tours, S.; Agostin, M. D. L. A.; Studdert, G. 2014. Paraplow y cultivos de cobertura; efecto sobre algunas propiedades físicas bajo siembra directa. (en línea). Buenos Aires, AR, s.e. 11 p. Consultado 9 oct. 2015. Disponible en <http://www.engormix.com/MA-agricultura/soja/articulos/paraplow-cultivos-cobertura-efecto-t6414/415-p0.htm>

9. ANEXOS

KRIGINGS Y SEMIVARIOGRAMAS



Resistencia a la penetración para las fajas con paraplow (A) y resistencia a la penetración para las fajas sin paraplow (B).

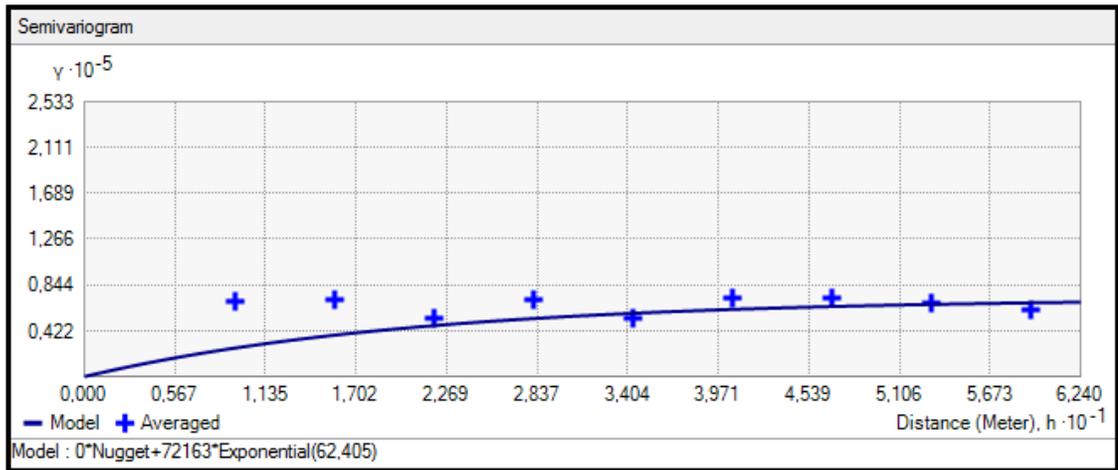


Figura No. 6. Resistencia a la penetración de 8-20 cm

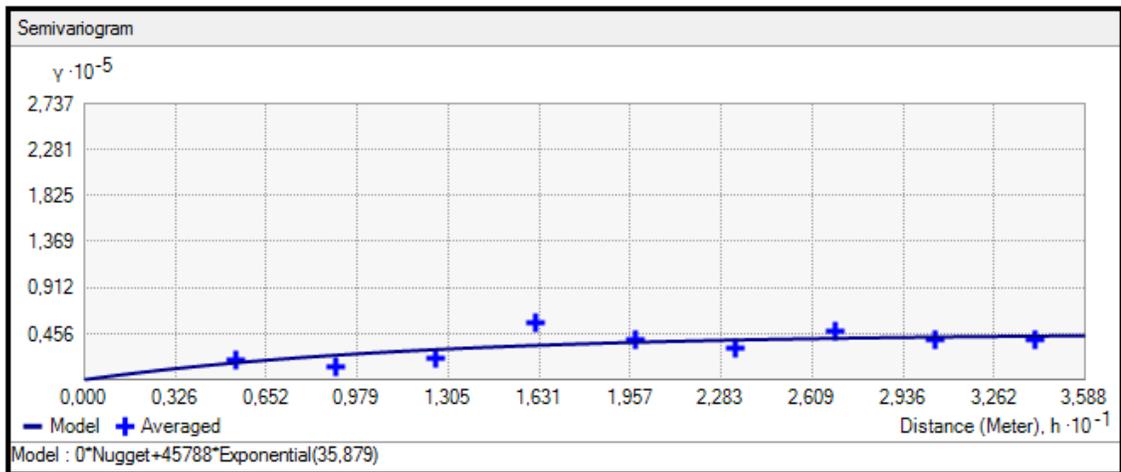


Figura No. 7. Resistencia a la penetración de 20-40 cm

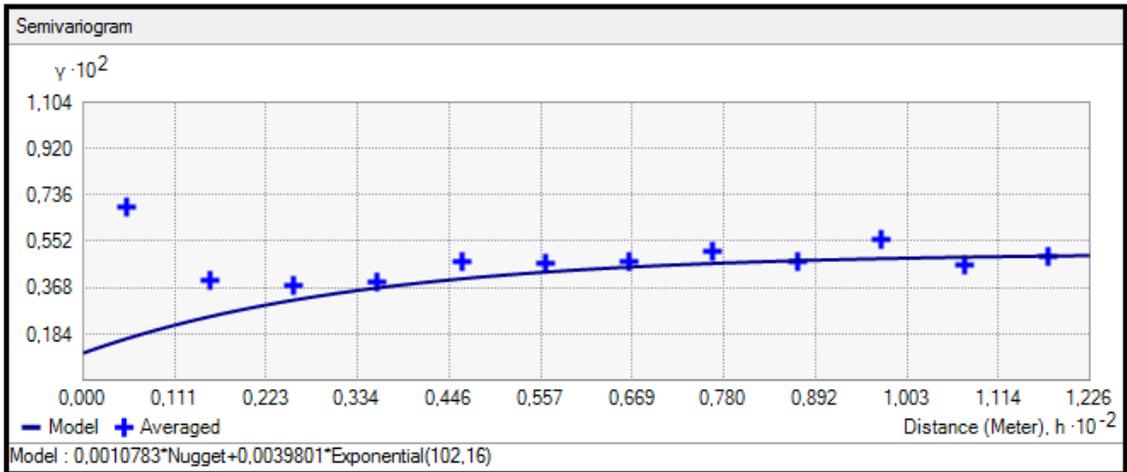


Figura No. 8. Semivariograma de NDVI

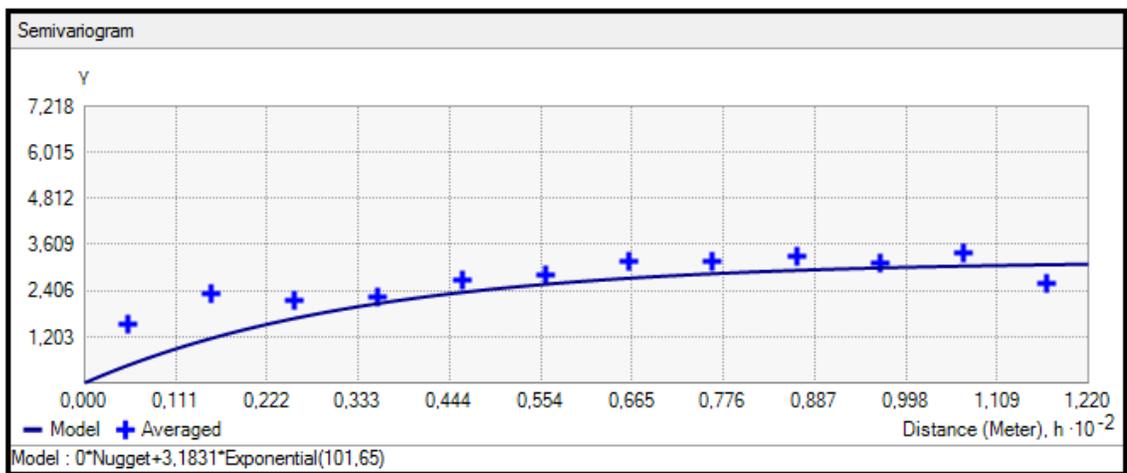


Figura No. 9. Semivariograma de temperatura de hoja

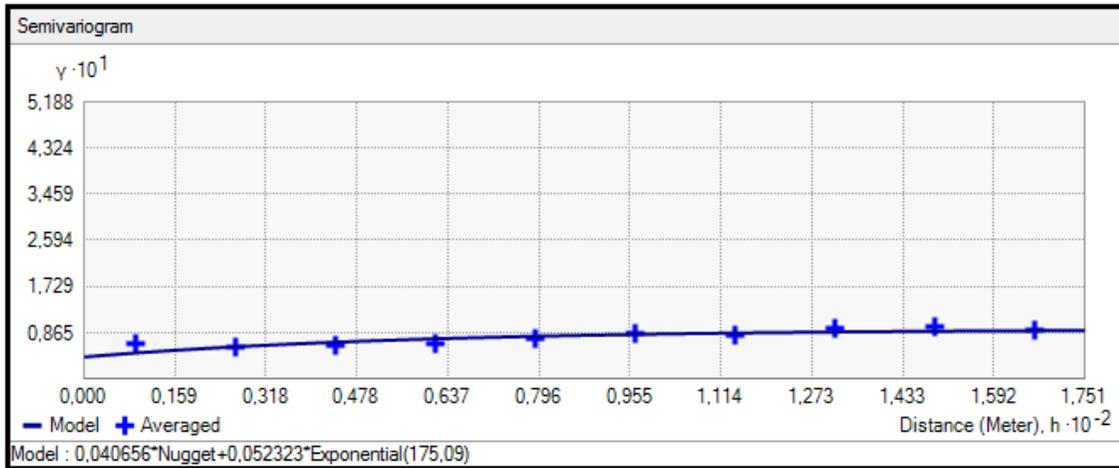


Figura No. 10. Semivariograma de rendimiento

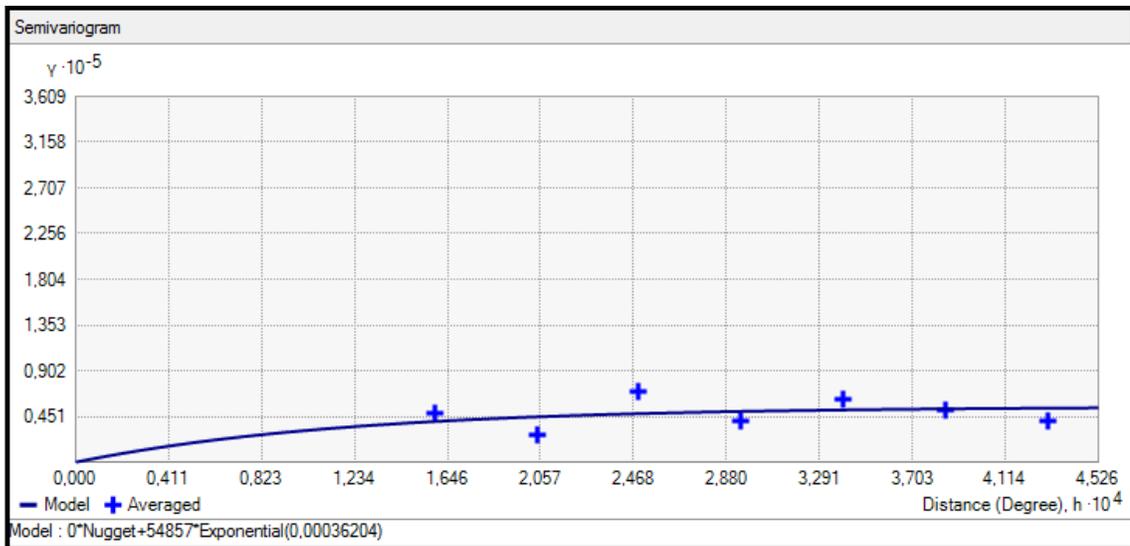


Figura No. 11. Semivariograma de resistencia a la penetración de 8 a 20 cm para las fajas testigos.

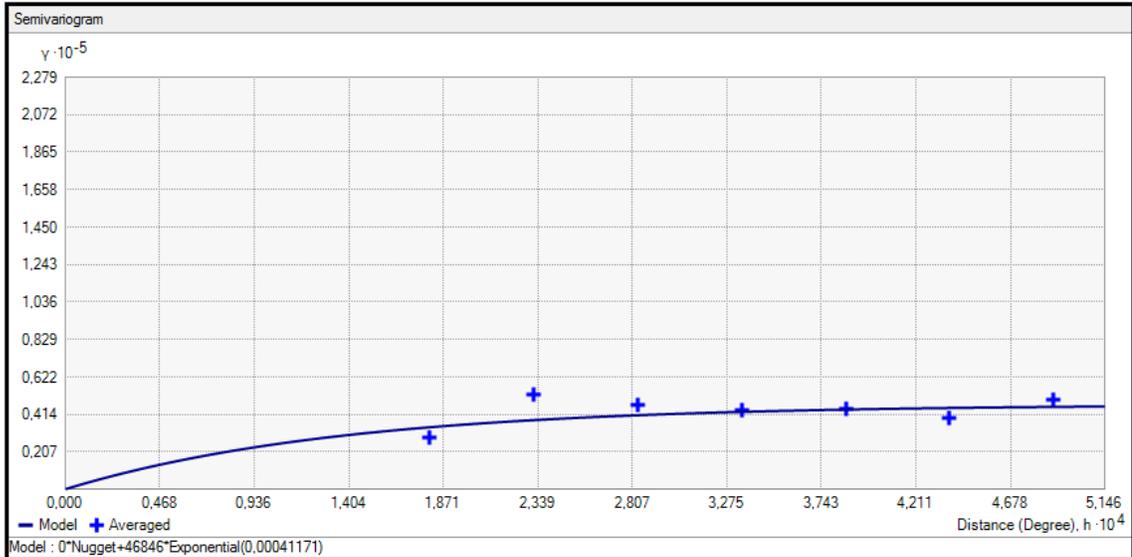


Figura No. 12. Semivariograma de resistencia a la penetración de 8 a 20 cm para las fajas con paraplow.

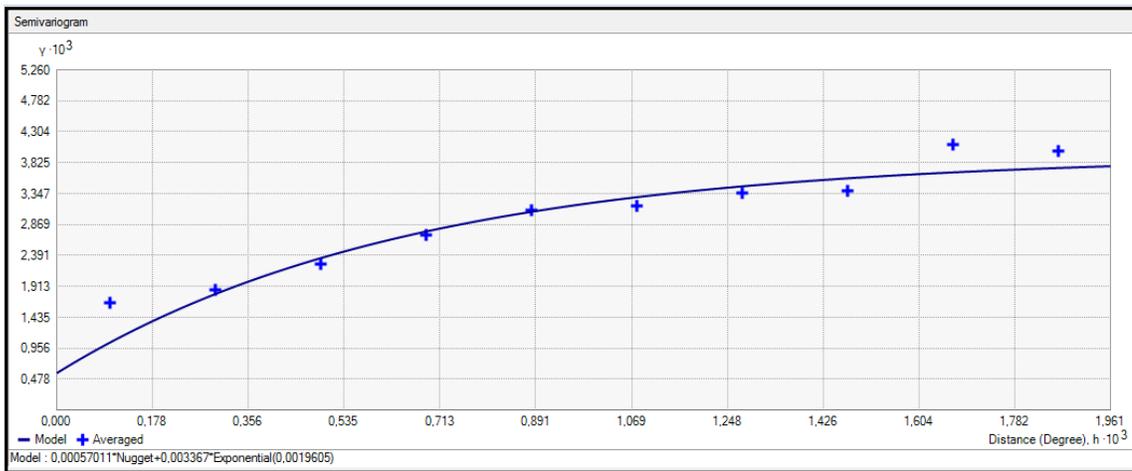


Figura No. 13. Semivariograma de potasio intercambiable de 0 a 15 cm de profundidad.

Resultados estadísticos de los Krigings

El mapeo de las variables se realizó con el software argis 10.1; con el método de análisis espacial krigings, de tipo ordinario.

Se utilizó el out type predicción, con una única base de datos, sin trend tipo. Método de búsqueda de vecinos fue estándar, realizando la correlación con los puntos más cercanos (vecinos a incluir).

El variograma seleccionado fue semivariograma, modelo exponencial, con anisotropía. Error se compone 100% a error de medición.

Cuadro No. 12. Variables de los krigings

Kriging	Nugget	Range	Sill	Nugget/sill
Resistencia a la penetracion de 8-20 cm	0	59	73	0
Resistencia a la penetracion de 0-8 cm	37,6	135	26	0,278
Resistencia a la penetracion de 20-40 cm	0	43	47	0
Resistencia a la penetracion de 0-40 cm	0	36	49	0
Humedad	60	32	30	1,875
Conductividad	54,7	105	39	0,520
Profundidad a la que se alcanzó los 2 MPa cm2 en suelo húmedo	61	77	150	0,792
Profundidad a la que se alcanzó los 2 MPa cm2 en suelo seco	10	32	5	0,312
Población	21	437	5	0,048
NDVI	0,0010	102	0,0039	0,25
Temperatura de hoja	0	102	3	0
Rendimiento corregido	0,04065	175	0,05232	0,77
Resistencia a la penetración de 8 a 20 cm para las fajas testigos.	0	39	46497	0

Resistencia a la penetración de 8 a 20 cm para las fajas con paraplow.	0	41	46846	0
K intercambiable de 0 a 15 cm	0,00057	200	0,0034	0,20

CARACTERIZACIÓN EDÁFICA

Perfil 1

Horizontes	Profundidad	Textura tentativa	Observaciones
A	0 -7	franco-limoarenoso	Con bastante arena color bien oscuro
B	7-22	franco arcilloso	un poco menos de arena que el A
Bt1	22-58	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
Bt2	58-85	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
Bt3.. ?	85-1+	Arcilloso	comienzan a aparecer color más negro pardo claro y muy pesado



Perfil 6 y 8 idem perfil 1.

Perfil 2



Horizontes	Profundidad	Textura tentativa	Observaciones
A	0 -11	franco-limoarenoso	Con bastante arena color bien oscuro
B	11-30	franco arcilloso	un poco menos de arena que el A
Bt	30-65	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
BC?	65-83	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
BC	83-1.06 +	Arcilloso	comienzan a aparecer color más negro pardo claro y muy pesado

Perfil 3



Horizontes	Profundidad	Textura tentativa	Observaciones
A	0 -10	franco-limoarenoso	Con bastante arena color bien oscuro
B	10-28	franco arcilloso	un poco menos de arena que el A
Bt	28-50	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
BC 1	50-68	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
BC 2	68-80	Arcilloso-limoso	comienzan a aparecer color más negro pardo claro y muy pesado
Ck	80+	Limo-arcilloso	Moderadamente pesado con carbonato

Perfil 4



Horizontes	Profundidad	Textura tentativa	Observaciones
A	0 -10	franco-limoarenoso	Con bastante arena color bien oscuro
B	10-25	franco arcilloso	Un poco menos de arena que el A poco fértil. Ver si tiene sodio
Btk	25-68	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua
Bck	68-94+	Arcilloso	textura muy pesada con una cinta continua

8.2.3. Perfil 7



Horizontes	Profundidad	Textura tentativa	Observaciones
A	0 -8	franco-limoarenoso	Con bastante arena color bien oscuro
B	8-24	franco arcilloso	Un poco menos de arena que el A poco fértil. Ver si tiene sodio

BCK	24-57	Arcilloso	Textura no tan pesada mucho carbonato
Ck	57-70+	Arcilloso	Textura media con mucho carbonato

Perfil 5 idem perfil 7.

8.2.4. Perfil 9



Horizontes	Profundidad	Textura tentativa	Observaciones
A	0 -8	franco-limoarenoso	Con bastante arena color bien oscuro
B	8-24	franco arcilloso	Un poco menos de arena que el A poco fértil. Ver si tiene sodio
BCK	24-52	Arcilloso	Textura pesada color pardo rojizo
Ck	52+	Arcilloso	Textura pesada color pardo rojizo

8.3. RESUMEN PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Rendimiento

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento	104	0,23	0,13	28,66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	35365120	11	3215011	2,45	0,01
Tratamiento	442380	1	442380	0,34	0,563
Zona	26457188	2	13228594	9,39	0,031
Repetición	1522476	2	761238	0,58	0,563
Tratamiento*Zona	1657023	2	828512	0,63	0,535
Error "a"	5633060	4	1408265	1,07	0,375
Error	120953317	92	1314710		
Total	156318438	103			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=446,60780

Error: 1314709,9727 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.
S/P	4011	52	161 A
C/P	3879	52	161 A

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

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=795,71848

Error: 1408265,0263 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.
2	4491	42	183 A
3	4057	30	217 A B
1	3287	32	210 B

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

Profundidad a la que se alcanzó los 2000 HPa. cm² en suelo húmedo (cm)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	CV
Penetrómetro seco	104	0,24	0,15	40,54	22,34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5383	11	489	2,62	0,006
Tratamiento	1692	1	1692	9,05	0,0034
Repetición	591	2	295	1,58	0,2116
Zona	1493	2	746	2,74	0,18
Tratamiento*Zona	937	2	468	2,50	0,09
Error "a"	1090	4	273	1,46	0,22
Error	17203	92	187		
Total	22586	103			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=5,32618

Error: 186,9858 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
C/P	37,69	52	1,92	A
S/P	29,52	52	1,92	B

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

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=14,20929

Error: 272,5309 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
3	36,76	30	3,02	A
2	35,95	42	2,55	A
1	28,1	32	2,92	A

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

Profundidad a la que se alcanzó los 2000 HPa. cm² en suelo seco (cm)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Penetrómetro humedo	104	0,4	0,33	19,84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1804	11	164	5,62	<0,0001
Tratamiento	3	1	3	0,12	0,7336
Repetición	464	2	232	7,96	0,0006
Zona	280	2	140	0,77	0,52
Tratamiento*Zona	438	2	219	7,51	0,00
Error "a"	726	4	181	6,22	0,00
Error	2683	92	29		
Total	4486	103			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,10330

Error: 29,1594 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.
C/P	27,12	52	0,76 A
S/P	26,75	52	0,76 A

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

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=11,59285

Error: 181,4059 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.
2	29,06	42	2,08 A
3	26,47	30	2,47 A
1	25,27	32	2,38 A

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

Resistencia a la penetración de 0-8 cm

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Res. pen. 0-8 cm	94	0,28	0,19	31,53

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1631613	11	148328	2,93	0,0026

Tratamiento	261036	1	261036	5,16	0,0257
Repetición	402702	2	201351	3,98	0,0224
Zona	557856	2	278928	3,89	0,12
Tratamiento*Zona	123019	2	61510	1,22	0,30
Error "a"	287000	4	71750	1,42	0,24
Error	4148252	82	50588		
Total	5779865	93			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=92,56181

Error: 50588,4414 gl: 82

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
S/P	768,36	42	38,64	A
C/P	672,46	52	31,63	B

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

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=242,74317

Error: 71750,0072 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
1	819,81	32	47,4	A
2	722,29	37	45,79	A
3	619,13	25	59,93	A

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

Resistencia a la penetración de 8-20 cm

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Res. pen. 8-20 cm	96	0,48	0,42	18,32

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	3717969	11	337997	7,18	<0,0001
Tratamiento	1601276	1	1601276	34,02	<0,0001
Repetición	59805	2	29903	0,64	0,5323
Zona	1302568	2	651284	13,01	0,02
Tratamiento*Zona	554137	2	277068	5,89	0,00
Error "a"	200183	4	50046	1,06	0,38

Error	3954001	84	47071
Total	7671970	95	

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=88,22248

Error: 47071,4402 gl: 84

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
S/P	1286,01	44	36,41	A
C/P	1078,12	52	30,51	B

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

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=200,96002

Error: 50045,8655 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
1	1346,64	32	39,59	A
2	1166,79	39	36,2	A B
3	1032,77	25	50,05	B

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

Resistencia a la penetración de 20-40 cm

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Res. Pen. 20-40 cm	96	0,34	0,26	14,69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1882330	11	171121	3,96	0,0001
Tratamiento	19412	1	19412	0,45	0,5044
Repetición	121362	2	60681	1,41	0,251
Zona	1384634	2	692317	11,58	0,02
Tratamiento*Zona	117698	2	58849	1,36	0,26
Error "a"	239224	4	59806	1,38	0,25
Error	3627233	84	43181		
Total	5509562	95			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=84,49842

Error: 43181,3404 gl: 84

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
S/P	1408,01	44	34,87	A
C/P	1398,52	52	29,22	A

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

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=219,68357

Error: 59805,9002 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
1	1540,07	32	43,27	A
2	1432,13	39	39,58	A B
3	1237,61	25	54,71	B

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

Resistencia a la penetración de 0-40 cm

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Res. Pen. 0-40 cm	104	0,46	0,4	15,51

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2848331	11	258939	7,17	<0,0001
Tratamiento	5012	1	5012	0,14	0,7104
Repetición	310613	2	155306	4,3	0,0164
Zona	1367071	2	683536	4,13	0,11
Tratamiento*Zona	475633	2	237816	6,58	0,00
Error "a"	661865	4	165466	4,58	0,00
Error	3323074	92	36120		
Total	6171405	103			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=74,02655

Error: 36120,3691 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
S/P	1224,24	52	26,65	A
C/P	1210,18	52	26,72	A

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

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=350,12196

Error: 165466,3024 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
1	1342,76	32	71,98	A
2	1256,08	42	62,77	A
3	1052,79	30	74,52	A

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

Humedad en suelo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Humedad	104	0,55	0,490	18,17

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4736	11,00	431	10,16	<0,0001
Tratamiento	3810	1	3810	89,95	<0,0001
Repetición	8	2	4	0,1	0,9092
Zona	467	2	234	2,97	0,16
Tratamiento*Zona	27	2	13	0,32	0,73
Error "a"	315	4	79	1,86	0,12
Error	3897	92	42		
Total	8633	103			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=2,53508

Error: 42,3604 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
S/P	42,08	52	1	A
C/P	29,82	52	1	B

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

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=5,98300

Error: 78,8014 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
3	38,79	30	2	A
2	35,77	42	1	A
1	33,29	32	2	A

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

Conductividad a 15 cm

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Conductividad (15 cm)	104	0,5	0,44	23,55

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4467439	11	406131	8,45	<0,0001
Tratamiento	263052	1	263052	5,48	0,0214
Repetición	310283	2	155141	3,23	0,0441
Zona	3523728	2	1761864	26,44	0,0049
Tratamiento*Zona	64122	2	32061	0,67	0,5155
Error "a"	266534	4	66633	1,39	0,2446
Error	4419990	92	48043		
Total	8887430	103			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=85,37448

Error: 48043,3700 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
S/P	1002	52	31	A
C/P	900	52	31	B

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

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=173,08659

Error: 66633,4602 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
3	1221	30	47	A
1	828	32	46	B
2	804	42	40	B

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

Conductividad a 30 cm

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Conductividad (30 cm)	104	0,19	0,10	22,13

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	1765664	11	160515	2,02	0,0355
Tratamiento	25730	1	25730	0,32	0,5712
Repetición	22404	2	11202	0,14	0,869
Zona	1060711	2	530355	3,35	0,1395
Tratamiento*Zona	23979	2	11990	0,15	0,8605
Error "a"	632394	4	158098	1,98	0,1033
Error	7328201	92	79654		
Total	9093866	103			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=109,92997

Error: 79654,3634 gl: 92

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
C/P	1300	52	40	A
S/P	1268	52	40	A

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

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=266,61286

Error: 158098,4792 gl: 4

<u>Zona</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
3	1433	30	73	A
2	1221	42	61	A
1	1198	32	70	A

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

Temperatura de hoja

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Temp. Hoja	104	0,48	0,42	5,75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	151	11	14	7,79	<0,0001
Tratamiento	48	1	48	27,12	<0,0001
Repetición	7	2	3	1,96	0,1465
Zona	24	2	12	0,85	0,49
Tratamiento*Zona	6	2	3	1,73	0,18
Error "a"	56	4	14	7,89	<0,0001
Error	162	92	2		
Total	313	103			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,51675

Error: 1,7601 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.
S/P	23,8	52	0,19 A
C/P	22,4	52	0,19 B

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

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=2,51225

Error: 13,8938 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.
3	23,7	30	0,68 A
2	23,1	42	0,58 A
1	22,5	32	0,66 A

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

NDVI

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI	104	0	0	8,73

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,170	11	0,020	4,27	<0,0001
Tratamiento	0,130	1	0,130	36,76	<0,0001
Repetición	0,030	2	0,010	4,12	0,0194
Zona	0,000	2	0,000	0,05	0,95
Tratamiento*Zona	0,004	2	0,002	0,59	0,56
Error "a"	0,010	4	0,003	0,86	0,49
Error	0,330	92	0,004		
Total	0,500	103			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,02332

Error: 0,0036 gl: 92

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
C/P	0,720	52	0,010	A
S/P	0,650	52	0,010	B

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

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,03752

Error: 0,0031 gl: 4

Zona	Medias	n	E.E.	
1	0,690	32	0,010	A
2	0,690	42	0,010	A
3	0,680	30	0,010	A

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