

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

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

por

**Ricardo MOZZAQUATRO SÔNEGO
Miguel Ángel RAFFO BUSCO**

**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. Mónica Cadenazzi Pascual

Ing. Agr. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 27 de abril de 2016

Autor:

Ricardo Mozzaquatro Sônego

Miguel Ángel Raffo Busco

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres y hermanos por brindarnos todo su apoyo a lo largo de nuestra formación.

A nuestros amigos por acompañarnos a lo largo de esta etapa.

Al Ing. Agr. Oswaldo Ernst por el apoyo para la realización de este trabajo y Ramiro Izaguirre por su colaboración en el trabajo de campo.

A Sully Toledo por las correcciones realizadas.

A Ana Claudia Guillenea y su familia por el apoyo y colaboración.

A todos aquellos que nos acompañaron y apoyaron a lo largo de nuestra carrera.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
 1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	 1
1.1. ESCENARIO ACTUAL DEL SISTEMA DE AGRICULTURA CONTINUA EN URUGUAY	 1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. <u>Objetivo primario</u>	2
1.2.2. <u>Objetivos secundarios</u>	2
 2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	 3
2.1. CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELO	4
2.2. ESTIMACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN	6
2.3. CONSECUENCIAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO	7
2.4. CONSECUENCIAS EN LOS CULTIVOS	8
2.5. FORMAS DE REMEDIAR LA COMPACTACIÓN	10
2.5.1. <u>Paraplow</u>	11
2.5.2. <u>Laboreo biológico</u>	15
2.6. HIPÓTESIS	17
 3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	 18
3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL	18
3.2. ELEVACIÓN DEL TERRENO Y PERFILES DE SUELO	18
3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS	19
3.4. MANEJO DEL CULTIVO	19
3.5. DETERMINACIONES REALIZADAS	20
3.5.1. <u>A nivel del suelo (23/01/2015)</u>	20
3.5.2. <u>A nivel de planta</u>	20
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	21

3.6.1.	<u>Descripción estadística</u>	21
3.6.2.	<u>Análisis estadístico general en bloques completamente al azar</u>	21
3.6.3.	<u>Análisis espacial</u>	21
3.6.4.	<u>Determinación de zonas con compactación diferencial</u>	22
3.6.5.	<u>Análisis estadístico por zonas</u>	22
4.	<u>RESULTADOS</u>	23
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL AÑO.....	23
4.1.1.	<u>Precipitaciones y temperatura</u>	23
4.2.	DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA GENERAL	25
4.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
4.4.	ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS DATOS	30
4.4.1.	<u>Resistencia a la penetración</u>	30
4.4.2.	<u>Rendimiento</u>	32
4.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR ZONAS	33
4.5.1.	<u>Zonificación</u>	33
4.5.2.	<u>Comparación estadística</u>	35
4.5.2.1.	Variables medidas en estaciones de muestreo georreferenciada.....	35
4.5.2.2.	Rendimiento medido mediante monitor	39
5.	<u>DISCUSIÓN</u>	41
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	43
7.	<u>RESUMEN</u>	44
8.	<u>SUMMARY</u>	45
9.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	46
10.	<u>ANEXOS</u>	53

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resumen de las variables medidas en suelo	25
2. Resumen de las variables medidas en planta.....	26
3. Análisis estadístico de las variables físico-químicas medidas en suelo	27
4. Análisis estadístico de las variables medidas en planta.....	29
5. Parámetros del semivariograma para la resistencia a la penetración de 8 - 20 cm	31
6. Parámetros del semivariograma para la resistencia a la penetración de 20 - 40 cm	32
7. Parámetros del semivariograma para el rendimiento por planta.....	33
8. Número total de datos para cada tratamiento según zona	34
9. Contrastes estadísticos de resistencia a la penetración de 20-40 cm entre zonas	34
10. Comparación estadística de las variables medidas en suelo según zona	35
11. Comparación estadística de las variables medidas en planta según zona.....	38
12. Comparación estadística de rendimiento por hectárea según zona.....	39

Figura No.

1.	Mapa de elevación del terreno.....	18
2.	Croquis del diseño experimental.....	19
3.	Precipitaciones y temperatura durante octubre 2014 - mayo 2015 en relación al promedio 1980-2009 y etapas fenológicas del cultivo de soja.....	23
4.	Perfil de resistencia a la penetración para los primeros 40 cm de suelo.....	28
5.	Mapa de resistencia a la penetración de 8-20 cm.....	30
6.	Mapa de resistencia a la penetración de 20-40 cm.....	31
7.	Mapa de rendimiento por planta.....	32
8.	Mapa de zonas delineadas a partir de la resistencia a la penetración de 20-40 cm pre-tratamiento.....	33
9.	Perfil de resistencia a la penetración para las distintas zonas.....	36
10.	Distribución empírica de la resistencia a la penetración de 20-40 cm para las distintas zonas.....	37
11.	Distribución empírica del rendimiento por hectárea según zona.....	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ESCENARIO ACTUAL DEL SISTEMA DE AGRICULTURA CONTINUA EN URUGUAY

El rubro agrícola es de gran importancia en la economía del Uruguay, contribuyendo en 53,7% al PBI nacional. A su vez el conjunto de explotaciones agrícolas y agrícolas-ganaderas mixtas ocupan una superficie de 2.955.000 hectáreas (MGAP. DIEA, 2014).

Durante los últimos años la agricultura se ha intensificado y expandido hacia nuevas zonas, predominando los sistemas de producción con siembra directa y en agricultura continua (Ernst y Siri, 2011). Esto ha generado condiciones físicas restrictivas y procesos de degradación de la estructura del suelo, favorecidos muchas veces por factores propios de nuestros suelos como la textura, el clima húmedo y el frecuente tránsito de maquinaria y animales (Martino, 2001).

Los aumentos de los valores de resistencia a la penetración y densidad aparente en los sistemas de siembra directa dan indicios de que para muchas situaciones se está frente a fenómenos de compactación del suelo (Martino 1997, Ishaq et al. 2000). Son muchos los estudios que detallan los efectos negativos que se generan sobre las propiedades del suelo y el crecimiento de los cultivos. Entre ellos podemos encontrar la disminución en la utilización de agua almacenada en capas profundas del suelo (Letey, 1985), la deficiencia de oxígeno en la zona radicular (Martino, 1997), la reducción en la macroporosidad y en la tasa de infiltración (DeJong-Hughes et al., 2001), disminución de la actividad microbiana y cambios en la dinámica del nitrógeno (Tobert y Wood, 1992). En cuanto al efecto sobre los cultivos se han reportado disminuciones en la absorción de nutrientes (Wolkowski 2000, Ishaq et al. 2001) y en el rendimiento (Håkansson et al. 1987, Ishaq et al. 2001).

El aflojamiento mecánico del suelo con subsolador, utilizado en la forma y momento adecuado, podría ser una herramienta que viabilice el sistema actual de producción. Se pretende colaborar a generar indicadores para nuestros suelos, que ayuden a identificar el momento en que la compactación comienza a ser restrictiva para el rendimiento y a entender de forma más precisa la manera en que esto ocurre, para así

revertir el problema en suelos afectados y evitar la generación de problemas futuros en las áreas que aún no son afectadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo primario

Delinear zonas con diferente compactación dentro del área experimental, utilizando la resistencia a la penetración del suelo como indicador.

1.2.2. Objetivos secundarios

I) Evaluar el impacto de la descompactación en la resistencia a la penetración.

II) Evaluar la respuesta del rendimiento del cultivo a la descompactación.

III) Evaluar el efecto del paraplow en términos de las diferentes propiedades del suelo, de la capacidad para mejorar el suministro de nutrientes para las plantas y de la respuesta vegetal en el cultivo de soja.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para comprender la significancia del problema de compactación en los suelos de Uruguay, se debe comenzar por realizar un recorrido histórico de nuestros sistemas de producción a través de las últimas décadas, ya que en gran medida estos son los responsables de la situación actual y nos permiten explicar la condición de muchos de nuestros suelos agrícolas.

Hasta mediados del siglo XX la producción estaba sujeta a un modelo de agricultura continua con laboreo, este sistema generaba pérdida de calidad en los suelos lo cual se reflejaba en bajos rendimientos promedios. Dicha condición desmotivó la producción agrícola, disminuyendo el número de productores vinculados a la actividad y obligando a cambiar el sistema productivo para levantar restricciones en el rendimiento. Así fue en la década del 70`y 80` donde la producción se concentró en la zona litoral-sur, comenzando con sistemas de rotación con cultivos y pasturas perennes, lo que permitió mejorar la erosión y la calidad del suelo (Ernst y Siri, 2011).

Durante la década del 90` siguió el sistema de rotación pero esta vez se implementó con la adopción de la tecnología de siembra sin laboreo (siembra directa), lo que redujo aún más la erosión y la pérdida de productividad (Ernst y Siri, 2011).

Según Arbeletche y Carballo (2007) desde el año 2000 hubo un aumento de la superficie total explotada por los agricultores, este crecimiento se debe básicamente a la expansión del cultivo de soja. Ernst y Siri (2011) coinciden con el aumento del área sembrada con cultivos anuales, y lo atribuyen a dos procesos: intensificación en el área agrícola tradicional (litoral oeste), y expansión hacia nuevas zonas. También mencionan que esto viene de la mano de la sustitución del sistema tradicional de rotación con pasturas, por un sistema netamente agrícola sin laboreo, y con un aumento en el número de cultivos por año. Tal es así que Molfino (2013) afirma que Uruguay tiene utilizado prácticamente el límite de su potencial agrícola, en el marco de una práctica racional.

En el presente para muchos casos se cuenta con historias de más de una década de agricultura sin laboreo y sin rotación con pasturas. Nuestro sistema de producción de siembra directa puede estar limitado por la ocurrencia de restricciones físicas del suelo asociadas a procesos degradativos. La combinación de factores que caracteriza a la agricultura uruguaya determina la potencial ocurrencia de estos problemas, estos

factores incluyen: suelos de texturas medias a pesadas con baja capacidad de infiltración de agua, clima húmedo y frecuente tráfico de maquinaria y animales (Martino, 2001).

El proceso de reconstrucción de la estructura del suelo puede demandar largos períodos de tiempo, en estos casos sería útil encontrar la forma de acelerar dichos procesos a efectos de brindar viabilidad a los sistemas de siembra directa. Esto puede lograrse a través del aflojamiento mecánico del suelo preservando la cubierta de residuos y minimizando los efectos negativos sobre los agentes formadores de biocanales, otro enfoque para este problema sería explorar la capacidad de laboreo biológico, por medio de ciertas especies vegetales para desarrollar sistemas de raíces extensivos en suelos compactados (Martino, 2001).

A continuación nos concentramos en el estudio de la compactación, repasando las principales causas como así también sus consecuencias sobre las propiedades del suelo y los cultivos, y el efecto de la herramienta paraplow y laboreo biológico como medidas para aliviar restricciones físicas del suelo.

2.1. CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN DE SUELO

La compactación del suelo se produce cuando las partículas del suelo se presionan entre sí, reduciendo el espacio de poro entre ellos (DeJong-Hughes et al., 2001).

Las causas de la compactación pueden ser naturales y/o inducidas por el hombre, entre ellas se pueden encontrar la generada por fuerzas de gran escala o de pequeña, algunos ejemplos son el tráfico de ruedas, operaciones de labranza, rotación mínima de cultivos y el impacto de la gota de lluvia (DeJong-Hughes et al., 2001). Según Arvidsson y Håkansson (1996) el tráfico de maquinarias causa una densificación del suelo en el sitio de contacto entre rueda y suelo, que puede extenderse hasta distancias considerables desde la superficie. El incremento en la densidad aparente y la profundidad afectada dependen de factores como la textura del suelo, el contenido de humedad, la presión de contacto, el peso de los ejes, la velocidad del vehículo y el número de pasadas. Wolkowsky (2000) menciona que la compactación es conocida como un factor limitante en el rendimiento, ella existe por varias razones, por ejemplo el gran tamaño de los vehículos agrícolas, el aumento de operaciones en húmedo por el tamaño de la chacra y la falta de patrones de tránsito controlado en los campos.

DeJong-Hughes et al. (2001) definieron los causantes de la compactación de la siguiente manera:

- Impacto de la lluvia: es una causa natural de la compactación, se ve como una costra del suelo (por lo general menos de media pulgada de espesor en la superficie del suelo) que pueden afectar la emergencia de plántulas. El pasaje de una rotativa a menudo puede aliviar este problema.

- Operaciones de labranza: arado de vertedera o disquera causan capas compactadas graves, justo debajo de la profundidad de la labranza en algunos suelos. Esta capa en general es relativamente delgada (1-2 pulgadas de espesor), no puede tener un efecto significativo en la producción de cultivos, y puede ser aliviado mediante la variación de la profundidad de la labranza en el tiempo o por las operaciones especiales de labranza.

- El tráfico de ruedas: es sin duda la principal causa de la compactación del suelo. Con el aumento de tamaño de las explotaciones, la ventana de tiempo para conseguir que estas operaciones sean realizadas en forma oportuna es a menudo limitada. El peso de los tractores ha aumentado de menos de 3 toneladas en 1940 a aproximadamente 20 toneladas actuales para las grandes unidades motrices de cuatro ruedas. Esto es de especial preocupación debido a que la siembra de primavera se hace a menudo antes de que el suelo esté lo suficientemente seco para apoyar el equipo pesado de la siembra.

- Limitada Rotación de cultivos: dicha tendencia ha tenido dos efectos, la limitación de los diferentes sistemas de enraizamiento y sus efectos beneficiosos en romper la compactación del subsuelo, y el aumento de compactación a principios de la temporada de cultivo, debido a la mayor actividad y tráfico en el campo.

La carga impuesta sobre la superficie del suelo es un factor primario en la compactación, en particular a profundidades mayores 30 cm (Porterfield y Carpenter, 1986). Varios autores coinciden con que el peso de la maquinaria agrícola es cada vez mayor, y esto lleva a una mayor carga por eje y más profunda compactación del subsuelo (Carpenter et al. 1985, Håkansson et al. 1987), a menos que la capa superficial sea firme (Taylor, 1987). Danfors (1974) reportó que cargas por eje mayor a 6 toneladas pueden causar compactación del subsuelo a profundidades superiores a 40 cm, mientras que Håkansson et al. (1987) realizaron una serie de 26 experimentos de campo,

mostrando que el tráfico en la superficie de un suelo húmedo con vehículos con cargas por eje de 10 toneladas, en general resulta en respuesta negativa para el cultivo. Los mismos autores mencionan que hay otros factores aparte del peso de eje que van a influir en la compactación, por ejemplo el mayor contenido de arcilla de los suelos y el mayor número de pasadas con las máquinas también determinan una mayor compactación. Harris (1971) afirma que suelos de textura fina se comportan como más susceptibles a la compactación, debido a que tienen mayor porosidad que suelos de texturas gruesas.

De la misma manera Botta (2004) para estos sistemas de siembra directa, atribuye la compactación del suelo a la alta intensidad de tránsito resultante del pasaje de los tractores utilizados en la protección de los cultivos y en la cosecha. Ello ocurre especialmente cuando estas operaciones son realizadas con el suelo húmedo y con alta presión en los neumáticos.

Según Schaffer et al. (1992) el estado de compactación de un suelo determinará su traficabilidad, su susceptibilidad a la erosión, y la aptitud para el crecimiento vegetal. Según Martino (2001), el grado de empaquetamiento o compactación de las partículas de un suelo determina su capacidad para permitir el desarrollo de cultivos, su capacidad para soportar el tráfico y su susceptibilidad a la erosión, entre otros factores. Un suelo muy suelto puede suministrar un ambiente favorable para el desarrollo de las plantas, pero puede ser muy susceptible a la erosión y no permitir el tráfico de máquinas. En el otro extremo, suelos con alto grado de compactación pueden soportar el tráfico en un amplio rango de contenidos de humedad, pero imponen importantes restricciones para el crecimiento de cultivos.

2.2. ESTIMACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN

Evaluar la compactación es un desafío porque no hay valores absolutos que la representen, ni a que niveles está afectando negativamente el crecimiento y rendimiento de los cultivos. El penetrógrafo a través de la resistencia a la penetración (RP) da una medida relativa de la compactación, porque está afectado por factores tales como humedad y textura de suelo (Wolkowski, 2000). Lowery y Schuler (1991) afirman que la fuerza requerida para introducir un cono a través del suelo puede utilizarse para evaluar la compactación. Como referencia de los umbrales que determinan limitantes para las plantas se encontró un rango de 1500-3000 kPa. Al respecto Threadgill (1982) concluye que valores superiores a 1500 kPa comprometen o dificultan el normal desarrollo

radicular y por encima de 2500 kPa el crecimiento puede detenerse. Según Boone et al. (1986), Glinski y Lipiec (1990), la RP es un buen indicador de la calidad del suelo, por lo tanto esta herramienta permite monitorear el estado de compactación, que es una medida de la degradación de la estructura del suelo.

Si bien son muchas las variables que inciden en los valores de RP, conocer cómo actúan ayuda a elegir el momento adecuado de muestreo y la interpretación de los resultados (Cazorla et al., 2006).

2.3. CONSECUENCIAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Según Martino (1997) el factor físico más limitante bajo siembra directa, en los estudios realizados, ha sido la resistencia mecánica para el desarrollo de raíces de cultivos de verano, lo que impidió una buena utilización del agua almacenada en capas profundas del suelo, a lo que se le debe sumar la reducida capacidad de infiltración y de retención de agua en el suelo (Letey, 1985). Como segundo factor en orden de importancia Martino (1997) cita la deficiencia de oxígeno en las primeras etapas de desarrollo de los cultivos de invierno, que resultó en reducida tasa de emergencia y escasa profundización de las raíces. Según DeJong-Hughes et al. (2001) en condiciones donde los suelos están fuertemente compactados sucede que presentan pocos macroporos y tienen una tasa reducida de infiltración de agua y drenaje de la capa compactada. El mismo autor también observó que la compactación del suelo aumenta la resistencia a la penetración, lo que genera que las raíces deban ejercer mayor fuerza para penetrar en la capa compactada.

Ishaq et al. (2000) mostraron que la compactación provoca el aumento de la densidad aparente del suelo en un 16%, y la disminución de porosidad total de 0,37 a 0,27 m³, y el espacio poroso lleno de aire de 0,16 a 0,06 m³. La RP en la zona compactada aumentó de 1,0 a 4,83 MPa. Torbert (1992) registró que cambios en la estructura y el tamaño de los poros, así como la cantidad de espacio poroso lleno de agua podrían explicar la disminución de la actividad microbiana y cambios en la dinámica del N. Los cambios en la densidad aparente también tuvieron un efecto significativo sobre la actividad microbiana del suelo. A medida que aumentaba la densidad aparente, la respiración del suelo se redujo. La explicación más plausible para estos resultados es que la compactación del suelo cambió las condiciones del suelo a un estado anaeróbico, que resulta en reducción de la actividad microbiana aeróbica y el aumento de la

desnitrificación. La compactación del suelo probablemente redujo la proporción de grandes a pequeños poros resultando en un área de superficie interna mayor de suelo cubierto con agua a pesar de que no se cambió el porcentaje total lleno de agua.

Motavalli et al. (2003) encontraron que dependiendo el régimen hídrico del año estarían determinadas las limitantes que genere la compactación, en años secos se convierte en un grave problema restringido el crecimiento de la raíz, puede conducir al aumento de estrés hídrico. En años húmedos, la compactación del suelo disminuye la disponibilidad de N debido al aumento de las tasas de desnitrificación y escorrentía. Ambas situaciones llevarían a disminución en el rendimiento.

En experimentos realizados en Suecia donde se sometieron elevadas cargas por eje, la resistencia del suelo se midió en la capa de 35-45 cm 1-2 años después del tráfico experimental. En estas parcelas la fuerza era 17% más alta que en las parcelas de control. Seis años después, la fuerza aún era 15% más alta, esto indica que la compactación del subsuelo es muy persistente (Håkansson, 1985).

2.4. CONSECUENCIAS EN LOS CULTIVOS

Ishaq et al. (2001) encontraron que la densidad de raíz, medida en la etapa de floración, disminuyó notablemente con la compactación durante 1997-1998, pero este efecto no fue consistente durante el período 1998-1999. Para trigo la densidad de raíz por debajo de 0,15 m de profundidad se redujo significativamente y fue negativamente correlacionado con la densidad aparente del suelo. El mismo autor encontró que hubo una reducción en la absorción de nutrientes en trigo debido a la compactación del subsuelo, registró que la disminución para nitrógeno era del 12 al 35 %, para fósforo del rango de 17-27 % y para potasio de hasta 24%. Para sorgo encontró reducción de la captación de nutrientes de 23% para N, 16% para P, y 12% para K. Lowery y Schuler (1991) estudiando los efectos de la compactación del subsuelo en la absorción de nutrientes por el maíz (*Zea mays L.*), experimentaron compactando el suelo con 4.5 (control), 8 y 12,5 Mg de carga por eje, observaron que la absorción del N y K disminuyeron, mientras que los de Fe y Mn aumentaron con el aumento de los niveles de compactación.

La compactación por otro lado afecta negativamente la capacidad de emergencia de las raíces, almacenamiento de agua en el suelo y eficiencia del uso del agua por los

cultivos (Radford et al., 2001). Wolkowski (2000) coincide con lo anteriormente mencionado afirmando que tiene un impacto directo en el desarrollo de los sistemas radiculares. También observó que niveles altos en la compactación se reflejan a menudo en el bajo rendimiento de estos suelos. Se ha pensado que puede estar relacionado con el impacto que se produce en la absorción de K por las plantas debido a la reducida aireación en suelos compactados. En contraposición dicho autor no encontró relación consistente con otros nutrientes.

Según Bingham (2001), Passioura (2002) la compactación del suelo afecta a propiedades claves (porosidad, densidad, la impedancia mecánica, conductividad hidráulica, agua disponible para la planta), y tiene el potencial de alterar drásticamente la morfología y fisiología vegetal.

Sadras (2005) estudiando la respuesta vegetal en captura y eficiencia en suelos compactados planteó las siguientes hipótesis: el efecto de la compactación del suelo en el crecimiento del cultivo es (i) mediada principalmente por la reducción en la captura de agua y radiación fotosintéticamente activa (PAR), y (ii) en segundo lugar afectado por la reducción de la eficiencia de transpiración (biomasa por unidad transpirada) y la eficiencia en el uso de la radiación (biomasa por unidad interceptada PAR). El mismo autor también señaló que la raíz tenía un papel en la inhibición del crecimiento de los brotes en respuesta a la compactación del suelo, ésta relación está bien establecida en experimentos con ambiente controlado, pero su influencia real en el campo es menos clara. Así mismo también demostró que la reducción del crecimiento de las plantas en suelos compactados tiene relación con la reducción de la conductancia estomática, con la reducción de la división celular, la expansión celular y la aparición de la hoja. Por lo tanto provoca alteraciones fisiológicas y morfológicas en las plantas, que pueden conducir a reducciones en el crecimiento y rendimiento del cultivo. Están involucrados un complejo conjunto de señales y sus interacciones, y mecanismos hidráulicos y no hidráulicos, sumados a las limitaciones para la captación de recursos del suelo. En conclusión Sadras (2005) afirmó que la compactación reduce drásticamente la canopia y la intercepción de radiación fotosintéticamente activa, pero no se encontró ningún efecto medible sobre la eficiencia de uso de la radiación, del mismo modo, la compactación redujo la transpiración sin cambiar la tasa transpiratoria. En su experimento, el efecto de la impedancia mecánica del subsuelo en el crecimiento de los cultivos representó variación en la captura de los recursos, sin ningún efecto evidente sobre la eficiencia en el uso de la radiación o la eficiencia de transpiración.

En cuanto al efecto en el rendimiento Håkansson et al. (1987) más allá de la influencia de diferentes factores sobre la respuesta de los cultivos, realizaron el ajuste del efecto del tránsito sobre las variaciones en el rendimiento, el mismo se obtuvo con la siguiente ecuación de regresión no lineal:

$$Y = 99.9 - 0.181 [C.t^{-128} \ln(n + 1)]; R^2 = 0,35$$

Donde Y es el rendimiento del cultivo, C el contenido de arcilla del suelo (%), t es el tiempo (número de años, después de tráfico experimental), y n es el número de pasadas, con cargas de 10 toneladas a 16 toneladas por eje. Esta ecuación predice una respuesta del cultivo negativa, aumentando con el contenido de arcilla (responsable aproximadamente de un 35% de la variación) y el número de pasadas, y disminuyendo con el tiempo luego del tráfico experimental. La explicación de lo anterior sea probablemente la compactación del subsuelo establecido a una profundidad de por lo menos 50 cm. Como se puede ver los principales factores que se asocian de forma inversa con el rendimiento son el contenido de arcilla y el número de pasadas con cargas elevadas. Por otro lado en beneficio del rendimiento menciona el tiempo transcurrido en años luego del tráfico experimental. El mismo autor observó que las pérdidas de rendimiento de los cultivos normalmente se hacen más persistentes con el aumento del contenido de arcilla.

Para estudios realizados sobre el rendimiento en grano de trigos se observó que en suelos compactados el mismo disminuyó en un 37% en 1997-1998 y 8% en 1998-1999 con respecto a suelos no compactados. Para el cultivo de sorgo el rendimiento de forraje disminuyó un 22% en 1998 y 14% en 1999 (Ishaq et al., 2001).

2.5. FORMAS DE REMEDIAR LA COMPACTACIÓN

Entre las opciones de gestión para remediar la compactación del subsuelo están la labranza profunda y la selección de la rotación de cultivos con raíces profundas (Larson et al., 1994). Ishaq et al. (2001) concluyeron que las medidas adecuadas, como cincelado periódico, el tráfico controlado, y la incorporación de cultivos con sistema de raíz pivotante profunda en el ciclo de rotación son necesarias para minimizar los riesgos de compactación del subsuelo.

2.5.1. Paraplow

El paraplow es un subsolador desarrollado en Inglaterra que trabaja a 30-50 cm de profundidad sin invertir el suelo, que mantiene la cobertura vegetal y por consiguiente permite realizar siembra directa. Su uso previo a la siembra de los cultivos ha aliviado parcialmente las restricciones físicas, resultando en mejores implantaciones de los cultivos, mayor volumen de suelo explorado por las raíces, y mayor productividad (Hipps y Hodgson, 1988).

Según Martino (1997) los rendimientos de cebada, trigo, girasol y maíz con siembra directa aumentaron por el uso del paraplow, en promedio de varios experimentos, en 19, 10, 50 y 104%, respectivamente. El mismo autor encontró que la residualidad de los efectos sobre las propiedades del suelo varió entre 8 meses y más de tres años, según las características de los suelos donde se instalaron los experimentos.

El laboreo de subsuelo a una profundidad de 30 cm en estudios realizados por Motavalli et al. (2003) tuvo múltiples efectos, incluida la superación de una barrera natural o provocada por el laboreo e incrementos en el contenido de agua volumétrica y el consumo de N. Según Cholaky y Cisnero (2007) la inclusión de operaciones de labranza profunda que fragmentan las capas endurecidas con el mínimo enterrado de la cobertura superficial, son una alternativa adecuada de manejo, ya que disminuyen significativamente la resistencia mecánica y la densidad aparente e incrementan la velocidad de infiltración.

Martino (2001) observó que el paraplow tiene efecto en el aumento en la porosidad que se debe casi exclusivamente al efecto sobre los poros grandes. Hipps y Hodgson (1988) reportaron un incremento de 7,8 a 13,3 % en el volumen de poros mayores a 60 μm en un suelo franco areno-arcilloso. El incremento en la capacidad de infiltración de agua fue otro efecto consistente observado por el uso de paraplow. Como fue mostrado por estos autores, muchas de las rajaduras formadas en el perfil del suelo después del pasaje del paraplow se continúan hasta la superficie. El incremento en la macroporosidad y la continuidad del sistema poroso serían las principales causas del aumento en la capacidad de infiltración.

Motavalli et al. (2003) observaron en un experimento con maíz (*Zea mays L.*), llevado a cabo en un suelo franco arenoso del sureste de Missouri, el laboreo de subsuelo a una profundidad de 30 cm tuvo múltiples efectos, incluida la superación de

una barrera natural o provocada por el laboreo e incrementos en el contenido de agua volumétrica y el consumo de N, especialmente para cultivos en el año 2001, con precipitaciones bajas a principio de temporada. También observó que la eficiencia de recuperación del N (NRE) fue significativamente mayor en el tratamiento con subsolador. El rendimiento en grano de maíz en promedio, fue superior en suelos descompactados que en los tratamientos compactados. Los resultados de este estudio sugieren que la labranza profunda es una herramienta de gestión que puede superar las restricciones de N y la disponibilidad de agua del suelo generada por la compactación del subsuelo en suelos de textura arenosa.

Varsa et al. (1997) vieron incrementos en el rendimiento de maíz sembrado sin laboreo en respuesta al efecto residual del subsolado en un suelo limoso con suela de arado, variando la respuesta según el régimen hídrico del año. Sadras (2005) observó que 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 (2005) comparando tratamientos compactados con suelos tratados mediante laboreo del subsuelo, observó que los cultivos control de trigo produjeron entre 1,2 y 2,9 tt/ha, y la mejora de rendimiento atribuible a la mitigación de la compactación del suelo varió de 0 a 43% en la colina y 20% en la pendiente. Este aumento en rendimiento fue acompañado en el 2003 en aumento de la proteína en grano y fue enteramente explicado por un aumento en la captura de recursos. La respuesta al subsolado permaneció durante al menos dos ciclos de cultivo. En los suelos más sensibles, el rendimiento de grano adicional cubrió y superó el costo del laboreo (US\$ 40/ha en 2003) en una sola temporada, mientras que los beneficios duraron 2-3 temporadas. El mismo autor encontró que en la capa superior del suelo (0,1 m) la resistencia a la penetración era baja, típicamente por debajo de 1 MPa, y en gran parte no afectada por el tratamiento de laboreo del suelo, aunque sí redujo drásticamente la resistencia a la penetración entre 0,1 y 0,3-0,4 m. La variación en la resistencia a la penetración del suelo tiene que ser considerada en el contexto del contenido de agua del suelo, ya que estas variables son inversamente proporcionales. Para perfiles de humedad del suelo medidos en 2002, el límite superior de retención de agua del suelo no era afectado por los tratamientos, mientras que sí reducían el límite inferior de agua disponible en la mitad inferior del perfil, lo que aumenta la disponibilidad total de agua en el tratamiento con subsolado.

Resultados similares fueron encontrados por Álvarez y Torres Duggan (2009) trabajando con maíz durante la campaña 2006/07 en suelos franco limosos sobre la Pampa Ondulada, donde se utilizó un equipo descompactador a 30 cm de profundidad. Como resultado la resistencia a la penetración disminuyó 37 y 24% en las capas de 0-25 cm y 0-40 cm, respectivamente, y la tasa de infiltración aumentó de testigo a descompactado en el estado V5-V6 de maíz. No se encontraron efectos de la descompactación sobre la densidad aparente y disponibilidad de nitratos. La descompactación aumentó significativamente el rendimiento de maíz con una respuesta media de 659 kg/ha (5,56%) y beneficios económicos positivos en todos los sitios. No se observaron efectos residuales de la descompactación sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento de los cultivos subsiguientes al maíz (soja de primera y de segunda). Los resultados indican que los cambios de resistencia a la penetración no perduraron de un año al otro, hecho que puede atribuirse tanto a efectos de consolidación natural, como a la mayor vulnerabilidad mecánica en que queda un suelo descompactado frente al tránsito de maquinarias.

Para cultivos de verano Martino (2001) cuantificó incrementos de más de 40% en el rendimiento de maíz y girasol con siembra directa luego de un laboreo sub-superficial con paraplow. Las variaciones en el rendimiento estuvieron asociadas a la mejora en implantación, en crecimiento del cultivo y en rendimiento individual de las plantas. Martino (1998) encontró un marcado efecto positivo del paraplow sobre la población de plantas de maíz (56 % de aumento), cebada (22%) y trigo (14%). Estos efectos se debieron principalmente a la mayor temperatura y a un mejor drenaje del suelo. Díaz-Zorita (2000) obtuvo resultados similares en suelos limo-arenosos degradados de Argentina en una rotación soja-maíz, donde el uso de paraplow y paratill mejoró la producción de materia seca y su rendimiento en grano.

En estudios realizados por Ernst y Bentancur (2001) coincidiendo con lo anterior, se vio que la descompactación sub superficial mejoró la implantación así como la absorción de N y el crecimiento individual hasta el estadio V4, lo cual produjo un incremento en la población lograda traducida en un mayor rendimiento de grano por hectárea.

Evans et al. (1996) en suelos arcillosos de Minnesota entre 1989 y 1991 indican que el subsolado tenía efectos a corto plazo sobre la densidad del suelo y otras propiedades físicas, pero no necesariamente mejora los rendimientos ni la disponibilidad de humedad, particularmente si la compactación no es evidente. Tampoco observó

ningún efecto en el cultivo durante tres temporadas después de la operación de subsolado. El tráfico de la rueda después de la operación de subsolado mostró que el suelo regresó rápidamente a los mismos valores de densidad aparente como los de las zonas no subsoladas.

Según Wolkowski (2000) para estudios realizados en Arlington durante los años 1997 y 1998 (maíz y soja), Ripon 1996 y Columbus 1996, 1997 y 1998 no se vieron respuesta en rendimiento para tratamientos de laboreo incluyendo el subsolado. En cambio el mismo autor en estudios realizados próximos al condado de Monitowoc sobre el efecto del subsolado en rotaciones de maíz/soja observó que aumentó significativamente el rendimiento en 1997 y 1998, pero para 1999 el rendimiento de soja no se vio afectado. En general los efectos negativos de la compactación del subsuelo en el rendimiento de los cultivos son mayores a medida que aumenta la proporción de arcilla en el suelo (Håkansson et al., 1987) y varían dependiendo del clima (Johnson et al., 1990).

La evidencia experimental confirma que la labranza profunda puede reducir eficazmente la impedancia mecánica en suelos, y podrá aumentar el crecimiento y rendimiento del cultivo y reducir la fracción de agua que se pierde a través de vías improductivas, incluyendo la evaporación del suelo y posiblemente el drenaje profundo, pero la respuesta real depende de condiciones estacionales, el tipo de suelo y la cantidad inicial y distribución de agua en el perfil del suelo (Sadras, 2005).

La labranza profunda no siempre es posible en Uruguay, debido a que la mayoría de los suelos agrícolas tienen textura de medio a fina, con predominio de minerales de arcilla tipo esmectita, y debido a la variabilidad climática interanual, las condiciones ideales del suelo para el subsolado no están siempre disponibles. La operación debe realizarse cuando el suelo tiene medio-bajo contenido de agua, por lo general durante los veranos, lo que sería demasiado tarde para los cultivos de verano que tienen una mayor respuesta al subsolado (García-Préchac et al., 2004).

Dexter (1988) destaca que se necesita desarrollar nuevos ensayos para estudiar las estructuras intermedias (por ejemplo 2-100 μm de diámetro), en estas escalas el conocimiento es poco satisfactorio debido a que las partículas son demasiado grandes para ser estudiadas por los químicos coloidales y sin embargo son demasiado pequeñas para ser visibles a simple vista. Entre estas partículas se almacena la mayor parte del agua para el uso de las plantas y contribuyen significativamente a la conductividad

hidráulica no saturada del suelo. La labranza por sí sola no puede remediar un terreno que ha sufrido degradación estructural grave, ya que esta no afecta directamente sólo la macro-estructura del suelo. Sin embargo, la labranza puede ser el primer paso en la mejora del suelo proporcionando espacios de los poros llenos de aire en el que la actividad biológica puede proceder.

Según Martino (1997) los trabajos realizados con el paraplow permiten concluir que el uso de esta herramienta, u otras similares, son una opción económicamente viable para solucionar problemas de exceso de compactación. El alto costo del subsolado no justificaría su uso con frecuencia anual, pero sí es posible seleccionar momentos estratégicos dentro de una rotación de cultivos, tales como al final de un período de pastoreos, o previo a la siembra de un cultivo de verano.

2.5.2. Laboreo biológico

Como se dijo previamente, el otro enfoque para evitar los problemas físicos en sistemas de siembra directa es explotar la habilidad de ciertas especies de desarrollar sus raíces en suelos con altos niveles de compactación (Sawchik, 2007).

El “laboreo biológico” mejora la estructura del suelo por medios tales como la acción de raíces de las plantas, lombrices de tierra y otros organismos del suelo. Las raíces de las plantas pueden mejorar el suelo por agregados vinculados físicamente y estabilizadores, compuestos de exudado que unen agregados, y canales en el suelo (Dexter, 1991). Estos canales, denominados bioporos, permanecen después de descomponerse las raíces y puede servir como caminos de baja resistencia para seguir el crecimiento de la raíz o el movimiento del agua. Estos poros también pueden resistirse a cerrar bajo esfuerzos de compactación, especialmente si están orientados verticalmente (Blackwell et al., 1990).

Cultivos forrajeros perennes, debido a sus extensas biomásas de raíces y continuidad de sus sistemas durante varios años, tienen un gran potencial para crear una red de bioporos y realizar la labranza biológica (Gentile, 2002). La misma autora estudiando el efecto de las raíces de festuca, alfalfa y achicoria bajo condiciones de campo en un suelo franco arcillo limoso al suroeste de Uruguay, encontró que el enraizamiento máximo en profundidad era mayor que 1 metro para cada una de las especies. La mitad de la biomasa de raíces en el perfil se encuentra en los 10, 20 y 30 cm

de festuca, alfalfa, y achicoria respectivamente. Los forrajes mostraron diferencias en la distribución de los recuentos de raíz, festuca y achicoria tenían una gran cantidad de ejes presentes en los primeros 20 cm, mientras que la alfalfa tenía un mayor número de ejes de raíces de 20 a 60 cm. Esto refleja diferencias en el tipo de raíz y grado de ramificación de cada especie. Más allá de las diferencias los tratamientos tuvieron un escaso efecto residual en el crecimiento y desarrollo de un cultivo posterior de sorgo granífero.

Si bien buena parte de los sistemas productivos continúan dentro de un modelo mixto de producción, gran parte de la agricultura se realiza hoy en sistemas de cultivo continuo bajo siembra directa. Con ello, obviamente, se reduce el menú de especies que puedan revertir procesos de degradación y por lo tanto, es necesario investigar nuevas especies anuales que puedan cumplir ese rol (Sawchik, 2007). En ese sentido, Chan y Heenan, citados por Martino y Ponce de León (1999) trabajando con colza, compararon el efecto sobre las propiedades físicas del suelo en rotación de trigo-colza durante cuatro años en relación con cuatro años consecutivos de trigo. Encontraron que el suelo que tuvo colza tenía mejor estructura, mayor macroporosidad y ofrecía menor resistencia a la penetración. Estas diferencias se mantuvieron hasta una profundidad de 0,18 m.

Otra alternativa es el uso de rábano forrajero que se caracteriza por presentar un sistema radicular pivotante y bien desarrollado, con capacidad para crecer en capas compactadas, formar bioporos estables y mejorar las propiedades físicas del suelo (Cubilla et al., 2002).

Experimentos realizados en invernadero por Müller et al. (2001) con rábano, avena negra y avena blanca, reportaron que el rábano forrajero se destacó frente a las demás especies en la acumulación de materia seca de raíz, tanto en la capa compactada como en la restante, manifestando mayor potencial para aumentar la aireación y reducir la compactación. La avena negra fue ligeramente superior a la avena blanca mostrándose menos sensible al aumento de la compactación.

La eficacia del método biológico también depende del estado inicial de la compactación del suelo, incluso las especies indicadas para esta finalidad tienen limitado el desarrollo de sus raíces cuando el suelo presenta niveles muy altos de densidad y resistencia a la penetración (Cubilla et al., 2002).

El proceso de laboreo biológico trae beneficios en la capacidad de infiltración de agua, intercambio de gases entre suelo y atmósfera y en la penetrabilidad de las raíces. De todas formas sus beneficios en cuanto a la posibilidad de mejorar las productividades aún no han sido demostrados (Martino, 2001). La rotación con plantas que tienen sistemas de raíces deseables, puede ahorrar energía y tiempo, y duran más que aflojar el suelo con paraplow (Elkins y Van Sickle, 1984).

2.6. HIPÓTESIS

i) La compactación no es pareja adentro del área sino que varía con una correlación espacial que permite identificar diferentes zonas.

ii) La resistencia a la penetración del suelo puede utilizarse para identificar y localizar zonas con compactación diferencial adentro de la chacra.

iii) Al menos una de las zonas delimitadas presenta diferencias en respuesta a la descompactación sub-superficial, en relación al rendimiento de soja y otras variables de respuesta de la planta y del suelo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

El predio experimental corresponde a la región Oeste de la República Oriental del Uruguay, en el departamento de Soriano (33.445710 y 33.448214 de latitud Sur y los meridianos 57.900426 y 57.902602 de longitud Oeste).

El material geológico predominante corresponde a sedimentos limosos con mucha influencia de la formación Fray Bentos, la cual generalmente la recubren en delgados espesores. El relieve es suavemente ondulado, con una pendiente de 1 a 3%. Los suelos predominantes son Brunosoles Éutricos Típicos y también pueden encontrarse Vertisoles Háplicos (MGAP. DIRENARE. DSA, 2006).

3.2. ELEVACIÓN DEL TERRENO

En la Figura No. 1 se presenta el mapa de elevación del terreno construido en base a datos monitor de rendimiento.

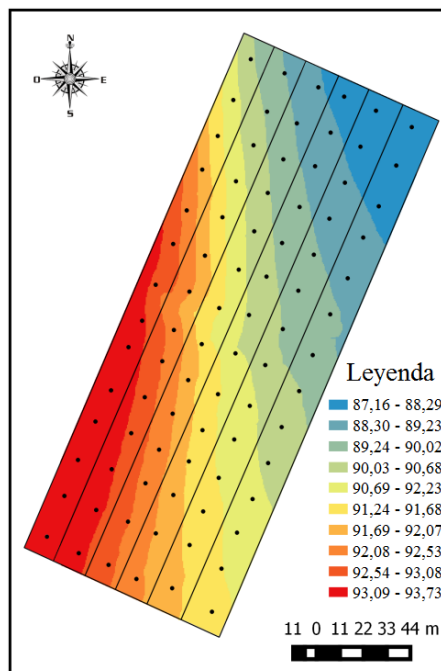


Figura No. 1. Mapa de elevación del terreno

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos tratamientos y tres repeticiones, los tratamientos testigo (TEST) y descompactado (DESC) se aplicaron sobre bloques que difieren entre sí en cuanto a característica de suelo y topografía. Los tratamientos se aplicaron sobre parcelas de 33 m de ancho por 260 m de largo, las cuales fueron orientadas de manera de contemplar la mayor variabilidad del suelo. En cada parcela se definió una grilla para el muestreo compuesta de 14 puntos distribuidos de forma uniforme en el espacio, los cuales son tomados como referencia para mediciones de las distintas variables, conformando una totalidad de 84 puntos georreferenciados (Figura No. 2). El área total del ensayo es de 2,61 hectáreas.

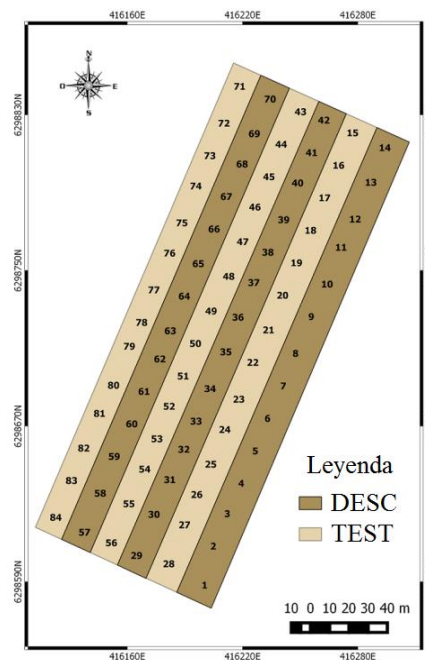


Figura No. 2. Croquis del diseño experimental

3.4. MANEJO DEL CULTIVO

El sistema está basado en varios años con agricultura continua bajo siembra directa. El paraplow fue aplicado durante la primavera del año 2014, para la posterior siembra de soja de primera con la variedad Don Mario 5958. La cosecha fue realizada el 5 de mayo del 2015 mediante una máquina comercial equipada con monitor de rendimiento georreferenciado, con el fin de poder cuantificar la variabilidad de la

respuesta entre los tratamientos. La respuesta a la descompactación se analizó considerando la diferencia con el testigo como variable de respuesta.

3.5. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.5.1. A nivel del suelo (23/01/2015)

Resistencia a la penetración (RP) en suelo hasta los 40 cm 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 a 8 cm, 8 a 20 cm y 20 a 40 cm.

Conductividad eléctrica (CE) 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.

Para todos los sitios georreferenciados se extrajo con un calador manual muestras de suelos a dos profundidades (0-7,5 y 7,5-15 cm), preparando una muestra compuesta conformada por cuatro tomas por punto de muestreo. Luego se procedió al retiro de raíces previo al secado en estufa a 45 °C por un período de 72 hs, las mismas fueron molidas para posterior análisis de nutrientes (P, K, Na, Mg, Ca y MO).

3.5.2. A nivel de planta

El 13 de febrero de 2015, con la soja en el estadio R2-3 (escala de Fehr y Caviness) se relevó la temperatura de cinco hojas diferentes por estación de muestreo utilizando un sensor manual UEi Inf 150, promediando 5 disparos por sitio, y se recolectaron quince hojas al azar completamente desarrolladas, conformando una muestra compuesta. Estas muestras posteriormente se secaron en estufa a 60 °C, durante un periodo de 72 hs. Finalmente fueron molidas para realizar análisis de nutrientes en hoja (Nt, P y K %).

El mismo día 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.

El 24 de marzo de 2015 (R6) se midió altura de planta (cm) tomando al azar cuatro plantas por sitio georreferenciado, posteriormente se cuantificó el número de nudos por tallo.

El 13 de abril de 2015 (R8) se cosecharon manualmente siete plantas al azar en cada estación y se realizó un conteo del número de vainas, posteriormente se estimó el peso de 100 granos y la humedad. Finalmente se calculó el rendimiento por planta y fue corregido por el porcentaje de humedad.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.6.1. Descripción estadística

Se realizó el análisis estadístico descriptivo de resumen de los resultados obtenidos mediante el programa InfoStat/E. Se determinaron los siguientes parámetros: media, desvío estándar, coeficiente de variación, percentiles 33 y 66.

3.6.2. Análisis estadístico general en bloques completamente al azar

Se comienza planteando un análisis estadístico clásico, para esto se toman la totalidad de los datos utilizando los sitios de muestreo dentro de faja como error de muestreo y se realiza la comparación de los tratamientos mediante el análisis de ANAVA, considerando el test de LDS de Fisher con 0,05 de significancia, los mismos se obtuvieron utilizando el programa estadístico InfoStat/E.

3.6.3. Análisis espacial

Para el análisis espacial se utilizó el programa R Studio. Los mapas se construyeron en base a semivariogramas unidireccionales, ajustados mediante el modelo exponencial y exponencial class. Para todos los casos se utilizó el Kriging Ordinario.

Para la clasificación de la correlación espacial se utilizó el criterio definido por Cambardella et al., citados por Pravia (2009) que indica que una relación nugget/sill inferior a 0,25 expresa alta dependencia, entre 0,25 y 0,75 dependencia moderada y superior a 0,75 dependencia débil.

3.6.4. Determinación de zonas con compactación diferencial

Se identificaron tres zonas contrastantes en base a la resistencia a la penetración del suelo sin descompactar (solo considerando los testigos). Las zonas se identificaron en base al estrato de profundidad entre 20-40 cm, ya que fue la que presentó mayor correlación espacial, con una relación Nugget/Sill de 0% (Anexo No. 1). Para el ajuste del semivariograma se tomaron en cuenta todas las direcciones y se utilizó el modelo exponencial que fue el que mejor se ajustó al semivariograma real, debido a que presenta la menor suma de cuadrados del error (Anexo No. 2). La determinación de zonas se realizó en base a la división de los datos en terciles definiendo visualmente las áreas de la parcela por debajo del primer tercil como zona de baja RP, las áreas entre el primer y el segundo tercil como zona de media RP y las superiores al segundo tercil como zona de alta RP.

3.6.5. Análisis estadístico por zonas

La diferenciación entre zonas siguió la misma dirección que los bloques previamente definidos, esto provocó que para la zona 2 y la zona 3 no quedaran repeticiones de los tratamientos. Frente a esta situación, se estudió la normalidad de cada población de datos y se realizó una comparación de medias utilizando la Prueba t de Student, verificando así si las muestras de datos pertenecen o no a una misma población. Se utilizó un nivel de significancia de 5% para rechazar la Hipótesis nula.

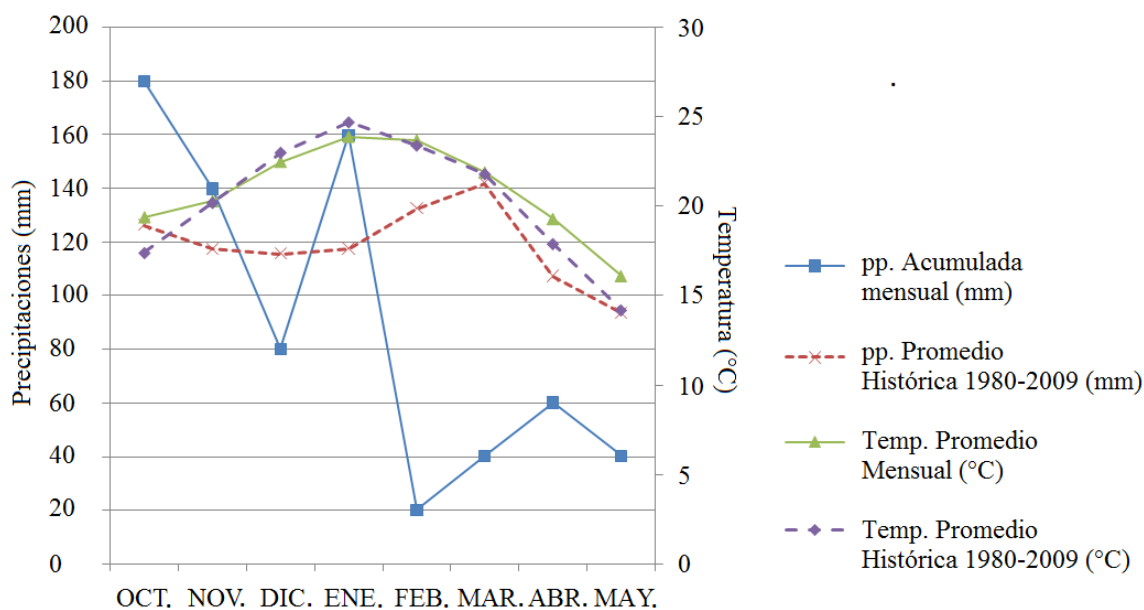
Para la variable rendimiento en grano se utilizaron los datos obtenidos con el monitor de rendimiento en las zonas 1 y 2. Los registros se realizaron en promedio cada 2 metros de distancia. Para la zona 3 se perdieron los datos del monitor de rendimiento, por lo que sólo se dispuso del rendimiento medido en 4 puntos por faja que representan el rendimiento medio de una superficie del ancho de la cosechadora por 30 m de distancia.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AÑO

4.1.1. Precipitaciones y temperatura

En base a los datos registrados en INIA para el período 1980–2009 se procedió a compararlos con las precipitaciones y temperaturas promedio para el período octubre 2014 a mayo 2015 (Figura No. 3).



Fuente: basado en registros de INIA. GRAS (2015).

Figura No. 3. Precipitaciones y temperatura durante octubre 2014 – mayo 2015 en relación al período 1980 – 2009 y etapas fenológicas del de soja.

Según los registros las precipitaciones en los meses de octubre, noviembre del 2014 y enero del 2015 fueron superiores al promedio histórico (+42,4% en octubre, +19,3% en noviembre y +36% en enero). El máximo pluviométrico tuvo lugar durante el mes de octubre. Esto determinó una alta producción inicial vegetativa del cultivo, por otro lado las lluvias al comienzo de enero acompañaron el inicio del período reproductivo.

Por lo contrario para los demás meses del período incluyendo diciembre y desde febrero hasta mayo se registraron precipitaciones muy inferiores al promedio histórico (-30,8% en diciembre, -84.1% en febrero, 71.8% en marzo, -44% en abril y -57.3% en mayo). Considerando las lluvias acumuladas durante todo el período, se estuvo 232.6 mm (24.4%) por debajo del promedio histórico.

Según Kantolic (2003) el período crítico de determinación de rendimiento (PC) para soja está relacionado con la fotosíntesis del cultivo entre floración y mediados de llenado de grano, siendo particularmente crítico durante R3–R5 según la escala de Fehr y Caviness. Para Smith, citado por De Melo et al. (2011) los requerimientos de agua para este cultivo varían entre 450 y 700 mm durante todo el ciclo, concentrándose la mayor parte durante el PC. Para nuestro caso este período estuvo dado entre los meses de febrero y marzo, lo que debido a las bajas precipitaciones durante esos meses y a las altas tasas de evapotranspiración potencial los requerimientos hídricos no fueron alcanzados.

Las temperaturas promedio en general superaron las del período histórico, a excepción de los meses de diciembre y enero que se posicionan levemente por debajo de la serie 1980–2009. El mes de mayo fue el mes que presentó promedio de temperaturas más altas en relación al promedio histórico, con un porcentaje de +13,8, en cambio el mes de enero fue el que tuvo temperatura media más baja que la serie histórica, con un porcentaje de -3,2.

4.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA GENERAL

Se presentan los datos descriptivos de todas las variables de suelo (Cuadro No. 1) y planta cuantificados (Cuadro No. 2).

Cuadro No. 1. Resumen de las variables medidas en suelo

Variable	n	Media	D.E.	CV (%)	P(33)	P(66)
RP 0-8 cm	84	599	239	39,9	491,4	690,8
RP 8-20 cm	84	1278	324	25,4	1129,9	1432
RP 20-40 cm	84	1277	323	25,3	1114,8	1401,9
CE 0-15 cm	84	716	221	30,8	630	776
CE 15-30 cm	84	1278	251	19,7	1254	1410
P 0-7,5 cm	84	32,7	11,9	36,5	27,1	32,8
P 7,5-15 cm	84	11,4	3,7	32,2	9,6	12
K 0-7,5 cm	84	1,17	0,26	21,9	1,1	1,3
K 7,5-15 cm	84	0,93	0,25	26,4	0,8	1,1
Na 0-7,5 cm	84	1,34	0,25	18,7	1,2	1,5
Na 7,5-15 cm	84	1,37	0,31	22,5	1,2	1,5
Mg 0-7,5 cm	84	2,33	0,34	14,4	2,2	2,5
Mg 7,5-15 cm	84	2,07	0,37	18,2	1,9	2,1
Ca 0-7,5 cm	84	22,5	4,04	18	20,5	24,5
Ca 7,5-15 cm	84	23,5	4,07	17,3	21,8	24,2
MO 0-7,5 cm	84	3,5	0,4	11,8	3,3	3,7
MO 7,5-15 cm	84	2,9	0,4	12,1	2,8	3

n: número de observaciones; RP: resistencia a la penetración (kPa); CE: conductividad eléctrica; P: fósforo (ppm P Bray I); K: potasio (meq K/100g de suelo); Na: sodio (meq Na/100g de suelo); Mg: magnesio (meq Mg/100g de suelo); Ca: calcio (meq Ca/100g de suelo); MO: materia orgánica (%).

La resistencia a la penetración media fue menor en el estrato superior (599 kPa), para las demás profundidades tomó valores similares (1278 y 1277 para la profundidad de 8–20 cm y de 20–40 cm respectivamente), presentó un CV elevado variando entre 25 y 40 % aproximadamente, lo que indica alta heterogeneidad dentro de la chacra.

Se observaron altas medias de los macronutrientes P (con media 32,7 ppm para 0–7,5 cm) y K (con media 1,17 meq para 0–7,5 cm) en suelo superando los niveles críticos para el cultivo. En general todas las propiedades físicas y químicas del suelo presentaron alta variabilidad.

Cuadro No. 2. Resumen de la variables medidas en planta

Variable	n	Media	D.E.	CV (%)	P(33)	P(66)
Temp. hoja (C°)	84	22,8	1,4	6	22,2	23,6
Altura (cm/pl.)	84	89,9	10,0	11,1	84,5	93,8
No. nudos/tallo	84	14	2	11	13	14
No. vainas/pl.	84	47	17	35	38	52
NDVI	84	0,74	0,08	11,4	0,75	0,78
NT (%)	84	5,0	0,3	6,3	4,9	5,1
P (%)	84	0,6	0,2	28	0,5	0,6
K (%)	84	2,4	0,5	20,5	2,3	2,7
Humedad grano (%)	84	11,7	0,3	2,7	11,6	11,9
Peso 100 granos (g.)	84	17,3	0,9	5	17	17,6
Rend. (g/pl.)	84	17,0	5,9	34,8	13,5	19,4

n: número de observaciones; Temp. hoja: temperatura de hoja, NT: nitrógeno total, P: fósforo, K: potasio, Rend.: rendimiento por planta.

El rendimiento medio por planta fue de 17 gramos. El percentil 33 se ubicó en 13,5 gramos y el 66 en 19,4 gramos, tuvo un alto CV (34,8%). En general existió una alta variabilidad en las propiedades medidas en planta, justificando el posterior análisis por tratamiento.

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En el Cuadro No. 3 se pueden observar las diferencias estadísticas entre tratamientos para los parámetros físico-químicos medidos a nivel del suelo.

Cuadro No. 3. Análisis estadístico de las variables físico-químicas medidas en suelo

Variable	n		Media		D.E.		CV (%)	
	T	D	T	D	T	D	T	D
RP 0-8 cm	42	42	625 a	573 a	248	230,4	39,7	40,2
RP 8-20 cm	42	42	1446 a	1111 b	288,1	269,8	19,9	24,3
RP 20-40 cm	42	42	1455 a	1100 b	277,6	263,1	19,1	23,9
CE 0-15 cm	42	42	784 a	648 b	195	226,4	24,9	34,9
CE 15-30 cm	42	42	1339 a	1217 b	160,9	307,3	12,0	25,2
P 0-7,5 cm	42	42	29,9 b	35,4 a	10,4	12,8	34,6	36,2
P 7,5-15 cm	42	42	11,3 a	11,6 a	4,1	3,2	36,5	27,9
K 0-7,5 cm	42	42	1,2 a	1,15 a	0,24	0,28	19,8	24,2
K 7,5-15 cm	42	42	0,94 a	0,93 a	0,22	0,27	24	29,2
Na 0-7,5 cm	42	42	1,30 a	1,38 a	0,25	0,25	19,3	17,9
Na 7,5-15 cm	42	42	1,35 a	1,40 a	0,29	0,33	21,3	23,8
Mg 0-7,5 cm	42	42	2,34 a	2,32 a	0,33	0,35	14	14,9
Mg 7,5-15 cm	42	42	2,07 a	2,07 a	0,41	0,33	20	16,13
Ca 0-7,5 cm	42	42	23,1 a	22 a	3,9	4,14	17	18,8
Ca 7,5-15 cm	42	42	24,1 a	23 a	3,6	4,43	15,2	19,3
MO 0-7,5 cm	42	42	3,4 b	3,5 a	0,38	0,43	11,3	12,2
MO 7,5-15 cm	42	42	2,9 a	2,9 a	0,35	0,35	12,1	12,1

T: testigo; D: descompactado; ; n: número de observaciones; RP: resistencia a la penetración (kPa); CE: conductividad eléctrica; P: fósforo (ppm P Bray I); K: potasio (meq K/100g de suelo); Na: sodio (meq Na/100g de suelo); Mg: magnesio (meq Mg/100g de suelo); Ca: calcio (meq Ca/100g de suelo); MO: materia orgánica (%).

Medias con una misma letra no son diferentes significativamente ($p \leq 0,05$).
Test: LSD Fisher.

La RP fue significativamente menor en el tratamiento con paraplow, disminuyendo 8,3, 23,2 y 24,4 % para la profundidad de 0 a 8, 8 a 20 y 20 a 40 cm respectivamente. La capa superficial no presentó diferencias significativas, pero en cambio sí lo hicieron las demás profundidades.

En la Figura No. 4 se grafica el perfil medio de resistencia a la penetración para ambos tratamientos.

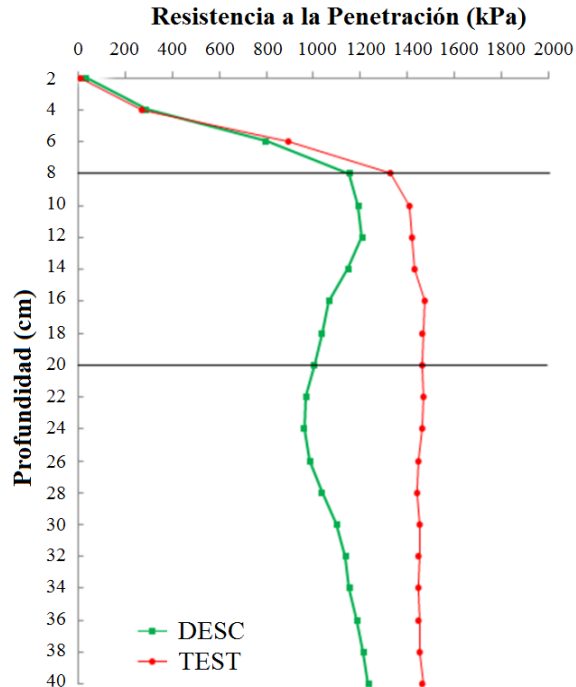


Figura No. 4. Perfil de resistencia a la penetración para los primeros 40 cm de suelo

Coincidiendo con el análisis estadístico previo, el tratamiento comenzó a tener efecto relevante a partir de los 6 cm en adelante, donde las curvas de los tratamientos empezaron a separarse. La mayor disminución en la RP se dio entre los 12 cm y los 32 cm de profundidad, de todas formas las diferencias fueron evidentes hasta los 40 cm.

Para la RP de 0–8 cm el coeficiente de variación tomó los mayores valores, en torno a 40% para ambos tratamientos. Para la RP de 8–20 y de 20–40 cm el comportamiento del CV fue similar, aumentando de aproximadamente 19% para el testigo a 24% para el descompactado.

La CE en ambas profundidades presentó un efecto positivo del tratamiento, mostrando diferencias significativas para ambos casos, con valores menores para los suelos descompactados.

Las variables P y % de MO medidas a una profundidad de 0–7,5 cm mostraron diferencias, encontrando mayor nivel en el tratamiento descompactado. Las demás

variables de nutrientes medidos en suelo no mostraron diferencias significativas según tratamiento. Los CV para los nutrientes en suelo en general aumentaron con el tratamiento descompactado, a excepción del P y Mg medidos a la profundidad de 7,5–15 cm, los cuales descendieron de 36,5 y 20 % a 27,9 y 16,1 % respectivamente.

En el Cuadro No. 4 se muestran las diferencias estadísticas entre tratamientos para las variables medidas es planta.

Cuadro No. 4. Análisis estadístico de las variables medidas en planta

Variable	n		Media		D.E.		CV (%)	
	T	D	T	D	T	D	T	D
Temp. hoja (C°)	42	42	23,3 a	22,4 b	1,1	1,5	4,6	6,5
Altura (cm/pl.)	42	42	88,1 b	91,7 a	10	9,7	11,4	10,5
No. nudos/tallo	42	42	14 a	13 a	1,6	1,4	11,5	10,7
No. vainas/pl.	42	42	45 a	49 a	16	17	35,2	34,8
NDVI	42	42	0.72 a	0.75 a	0.08	0.09	11.1	11.4
NT (%)	42	42	4,8 b	5,1 a	0,34	0,23	7,1	4,6
P (%)	42	42	0,6 a	0,6 a	0,2	0,16	31,2	24,8
K (%)	42	42	2,5 a	2,3 b	0,5	0,51	18,4	21,9
Humedad grano (%)	42	42	11,9 a	11,6 b	0,3	0,26	2,5	2,3
Peso de 100 granos (g.)	42	42	17,3 a	17,3 a	0,7	1	4,2	5,7
Rend. (g/pl.)	42	42	14,6 a	15,4 a	5,4	5,1	36,7	33,2

T: testigo; D: descompactado; Temp. hoja: temperatura de hoja; NT: nitrógeno total; P: fósforo; K: potasio; Rend.: rendimiento por planta.

Medias con una misma letra no son diferentes significativamente ($p \leq 0,05$). Test: LSD Fisher.

Las variables temperatura de hoja y altura de planta presentaron diferencias significativas entre tratamiento. También se observaron diferencias en el contenido de Nitrógeno total (NT) y de K, para el primero se observó mayor valor en el tratamiento descompactado, pero en el caso del K el mayor valor lo presentó el tratamiento testigo. El P no reportó cambios significativos según el tratamiento.

El % de humedad de los granos presentó diferencias según al tratamiento, de forma contraria se comportaron el peso promedio de 100 granos y el rendimiento por planta no presentando diferencias significativas según tratamiento.

Para la mayoría de los casos de las variables medidas en planta el CV no varió en gran medida entre los tratamientos. Para NT y P el descompactado disminuyó el CV, similar comportamiento se puede ver en rendimiento por planta pasando de 36,7% del tratamiento testigo a 33,2% para el tratamiento descompactado.

4.4. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS DATOS

4.4.1. Resistencia a la penetración

La RP de 0-8 cm no presentó correlación espacial, pudiéndose observar que la semivarianza no se modifica a través de la distancia (Anexo No. 3). Por tanto, no fue posible construir un mapa interpolado de esta variable.

En tanto, la RP en los estratos 8-20 y 20-40 cm mostraron correlación espacial, pudiendo generar mapas interpolados para toda el área experimental. (Figuras No. 5 y 6)

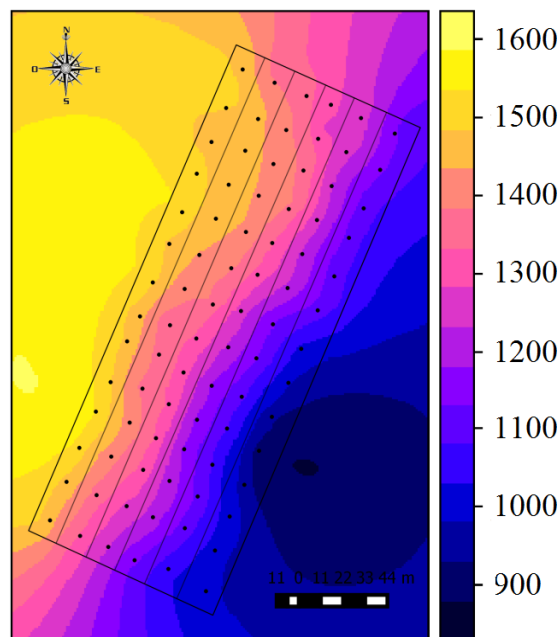


Figura No. 5. Mapa de resistencia a la penetración de 8–20 cm

Visualmente no se distinguen fajas separadas por tratamiento, sino que la RP presentó una correlación espacial longitudinal a los tratamientos de descompactación. Se

distinguen tres zonas: tercil inferior en colores amarillos al Noroeste; tercil medio en colores violáceos en la zona central; tercil superior en colores azules en el Sureste (valores bajos). Esto es reafirmado cuando se observa el semivariograma (Anexo No. 4), donde la semivarianza aumenta hasta un rango próximo a los 192,3 metros de distancia.

Para la realización del semivariograma se utilizó el modelo exponencial, cuyos parámetros se presentan en el siguiente (Cuadro No. 5).

Cuadro No. 5. Parámetros del semivariograma para la resistencia a la penetración 8-20 cm

Parámetros	Valor
Rango (metros)	192,3
Nugget	68411,4
Sill	105947,5
Relación Nugget/Sill	0,65

Se puede observar por su relación nugget/sill que se está frente a una correlación espacial moderada (Cambardella et al., citados por Pravia, 2009).

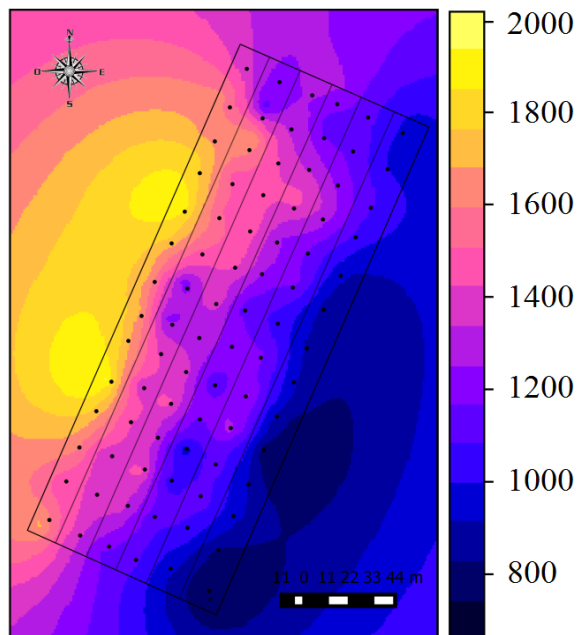


Figura No. 6. Mapa de resistencia a la penetración de 20–40 cm

La RP en el estrato 20-40, siguió la misma tendencia pero con correlación espacial fuerte (Cuadro No. 6). En el Anexo 5 se puede observar el semivariograma utilizado para la construcción del mapa.

Cuadro No. 6. Parámetros del semivariograma para la resistencia a la penetración 20–40 cm

Parámetros	Valor
Rango (metros)	67,7
Nugget	17177,5
Sill	134619,3
Relación Nugget/Sill	0,12

4.4.2. Rendimiento

En la siguiente Figura No. 7 se observa la distribución espacial del rendimiento por planta.

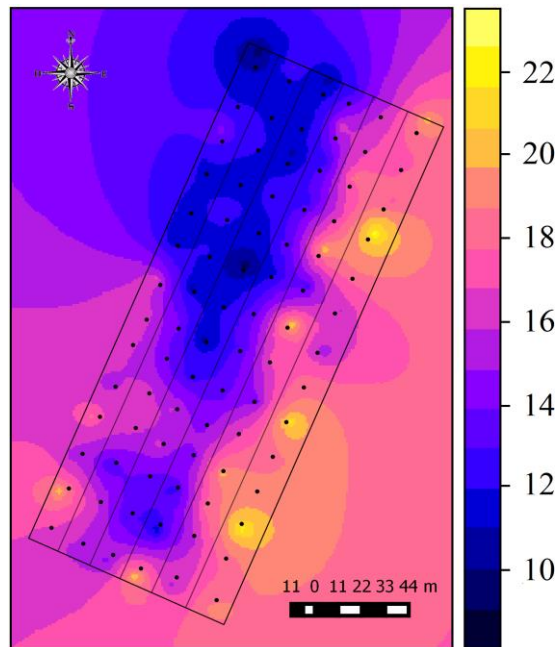


Figura No. 7. Mapa de rendimiento por planta

No se aprecia un efecto marcado por el tratamiento, no pudiéndose distinguir diferencias entre las franjas con paraplow y sin paraplow. Se observa la tendencia inversa a la RP asociándose los mayores valores de producción con los inferiores de RP.

El semivariograma de rendimiento (Anexo No. 6) fue construido en base al modelo exponencial class, en el Cuadro No. 7 se presentan sus parámetros.

Cuadro No. 7. Parámetros del semivariograma para el rendimiento por planta

Parámetros	Valor
Rango (metros)	100
Nugget	8,7
Sill	28,9
Relación Nugget/Sill	0.3

Puede observarse que existió una correlación espacial moderada a fuerte con una relación Nugget/Sill de 0,3 (Cambardella et al., citados por Pravia, 2009).

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR ZONAS

4.5.1. Zonificación

En la Figura No. 8 se presenta el mapa de zonas realizado a partir del kriging de resistencia a la penetración de 20–40 cm para los datos sin Praplow (Anexo No. 7).

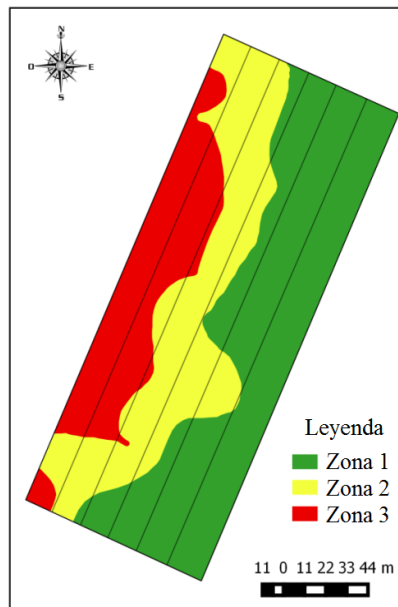


Figura No. 8. Mapa de zonas delineadas a partir de resistencia a la penetración de 20–40 cm pre-tratamiento

Como resultado se obtuvieron zonas de diferentes tamaños, abarcando distintas cantidad de observaciones, en el Cuadro No. 8 se observa el número de datos proveniente de la zonificación para cada tratamiento. En el anexo No. 8 y 9 se pueden observar el semivariograma y los parámetros utilizados para la construcción del mapa de zonas, se puede destacar una fuerte dependencia espacial para esta variable determinada por una relación Nugget/Sill de 0 (Cambardella et al., citados por Pravia, 2009).

La zona de baja RP mostró valores inferiores a 1344 kPa, la de RP media comprendió desde éste valor hasta 1566 kPa y la de alta resistencia, intuyó a todos los valores superiores al último. Se encontraron diferencias significativas entre todas las zonas (Cuadro No. 9).

Cuadro No. 8. Número total de datos para cada tratamiento según zona

ZONA	Baja RP		Media RP		Alta RP	
Tratamiento	T	D	T	D	T	D
Número observaciones (n)	14	21	16	13	12	8

T: testigo; D: descompactado.

Cuadro No. 9. Contrastes estadísticos de la resistencia a la penetración de 20-40 cm entre zonas

Contrastes	Medias		p-valor
Zona Baja RP(1) vs. Zona Media RP(2)	1166 (1)	1444 (2)	<0,0001
Zona Baja RP(1) vs. Zona Alta RP(3)	1166 (1)	1806 (3)	<0,0001
Zona Media RP(2) vs. Zona Alta RP(3)	1444 (2)	1806 (3)	<0,0001

Valores de p-valor inferiores a 0,05 son diferentes significativamente ($p \leq 0,05$).
Test: prueba t de student para muestras independientes.

4.5.2. Comparación estadística

4.5.2.1. Variables medidas en estaciones de muestreo georreferenciadas

En la Cuadro No. 10 se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las variables medidas en suelo para las diferentes zonas.

Cuadro No. 10. Comparación estadística de las variables medidas en suelo según zona

Variable	Zona baja RP			Zona media RP			Zona alta RP		
	T	D	P-valor	T	D	P-valor	T	D	P-valor
RP 0-8 cm	517	614	0.235	693	502	0.029	662	583	0.512
RP 8-20 cm	1213	1019	0.049	1497	1170	0.001	1649	1255	0.001
RP 20-40 cm	1165	953	0.001	1444	1197	0.010	1806	1328	0,001
CE 0-15 cm	655	549	0.154	858	780	0.266	835	695	0.081
CE 15-30 cm	1262	1128	0.267	1393	1270	0.024	1357	1367	0.758
P 0-7,5 cm	34,8	38,5	0.476	28,1	32,5	0.226	26,7	32,4	0.079
P 7,5-15 cm	12	11,7	0.735	12,4	10,5	0.265	9,1	13,1	0.009
K 0-7,5 cm	1,08	1,00	0.282	1,28	1,21	0.375	1,23	1,44	0.104
K 7,5-15 cm	0,84	0,8	0.644	1,05	1,02	0.740	0,92	1,12	0.042
Na 0-7,5 cm	1,26	1,36	0.174	1,39	1,4	0.877	1,23	1,38	0.154
Na 7,5-15 cm	1,43	1,44	0.902	1,36	1,41	0.660	1,26	1,27	0.959
Mg 0-7,5 cm	2,37	2,27	0.486	2,37	2,38	0.882	2,25	2,34	0.414
Mg 7,5-15 cm	2,20	2,12	0.491	2,07	2,1	0.892	1,91	1,91	0.992
Ca 0-7,5 cm	21,1	20,2	0.533	24,7	23,8	0.486	23,1	23,9	0.580
Ca 7,5-15 cm	22,4	21,4	0.461	25,3	24,8	0.732	24,3	24,3	0.988
MO 0-7,5 cm	3,7	3,7	0.932	3,3	3,4	0.480	3,1	3,2	0.328
MO 7,5-15 cm	3,1	3,1	0.939	2,9	2,8	0.440	2,6	2,7	0.179

T: testigo; D: descompactado; RP: resistencia a la penetración (kPa); CE: conductividad eléctrica; P: fósforo (ppm P Bray I); K: potasio (meq K/100g de suelo); Na: sodio (meq Na/100g de suelo); Mg: magnesio (meq Mg/100g de suelo); Ca: calcio (meq Ca/100g de suelo); MO: materia orgánica (%).

Valores de p-valor inferiores a 0,05 son diferentes significativamente ($p \leq 0,05$).
Test: prueba t de student para muestras independientes.

La resistencia a la penetración en la profundidad de 0–8 cm tuvo efecto del tratamiento solamente para la zona de media RP.

Para las siguientes profundidades de 8–20 cm y de 20–40 cm la RP tuvo diferencias significativas del tratamiento para todas las zonas delimitadas. En el estrato de 8-20 cm la magnitud del efecto del tratamiento fue mayor para la zona de alta resistencia (23,9% de variación), intermedia para la zona de media resistencia (21,8% de variación) y fue la mínima para la zona de baja resistencia (15,9% de variación). Para la profundidad de 20–40 cm la magnitud del efecto del tratamiento fue mayor para la zona de alta RP (26,5% de variación), y no tuvo grandes diferencias para las zona de baja (18,2% de variación) e intermedia RP (17,1% de variación). Estos resultados también pueden ser observados en la Figura No. 9, donde se presenta el perfil de RP para cada zona.

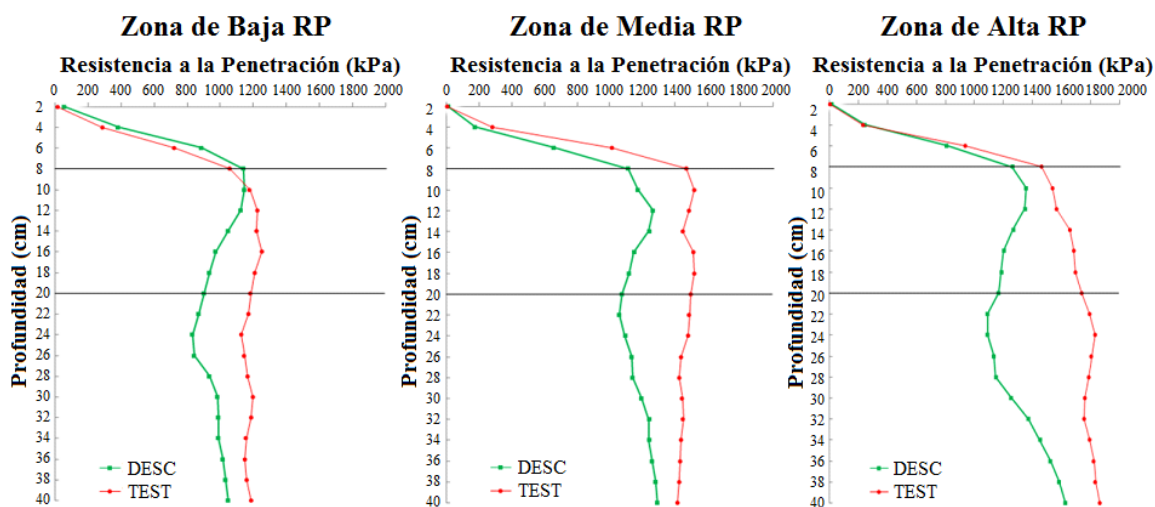


Figura No. 9. Perfil de resistencia a la penetración para las distintas zonas

Se encontró mayor respuesta a la descompactación a medida que aumentó la RP de la zona y en el estrato entre 12 y 30 cm.

La CE mostró diferencias significativas entre los tratamientos solamente en la zona de media RP, esto ocurrió para la profundidad de 15-30 cm.

La zona de alta RP fue la única que presentó diferencias en cuanto a la cantidad de nutrientes. El P tuvo respuesta para ambas profundidades, en el estrato superior las diferencias no fueron significativas pero el p-valor es próximo al del criterio de decisión, para este caso el aumento del nutriente fue de 5,71 ppm, equivalente a 21,4%. En el estrato inferior el P tuvo diferencias significativas aumentando 4 ppm (43,9%) para el

tratamiento descompactado. El K de 7,5–15 cm también presentó diferencias significativas aumentando 0,21 meq/100g de suelo (22,8%).

En la siguiente (Figura No. 10) se presentan la distribución empírica de la resistencia a la penetración de 20–40 cm en las distintas zonas para los dos tratamientos.

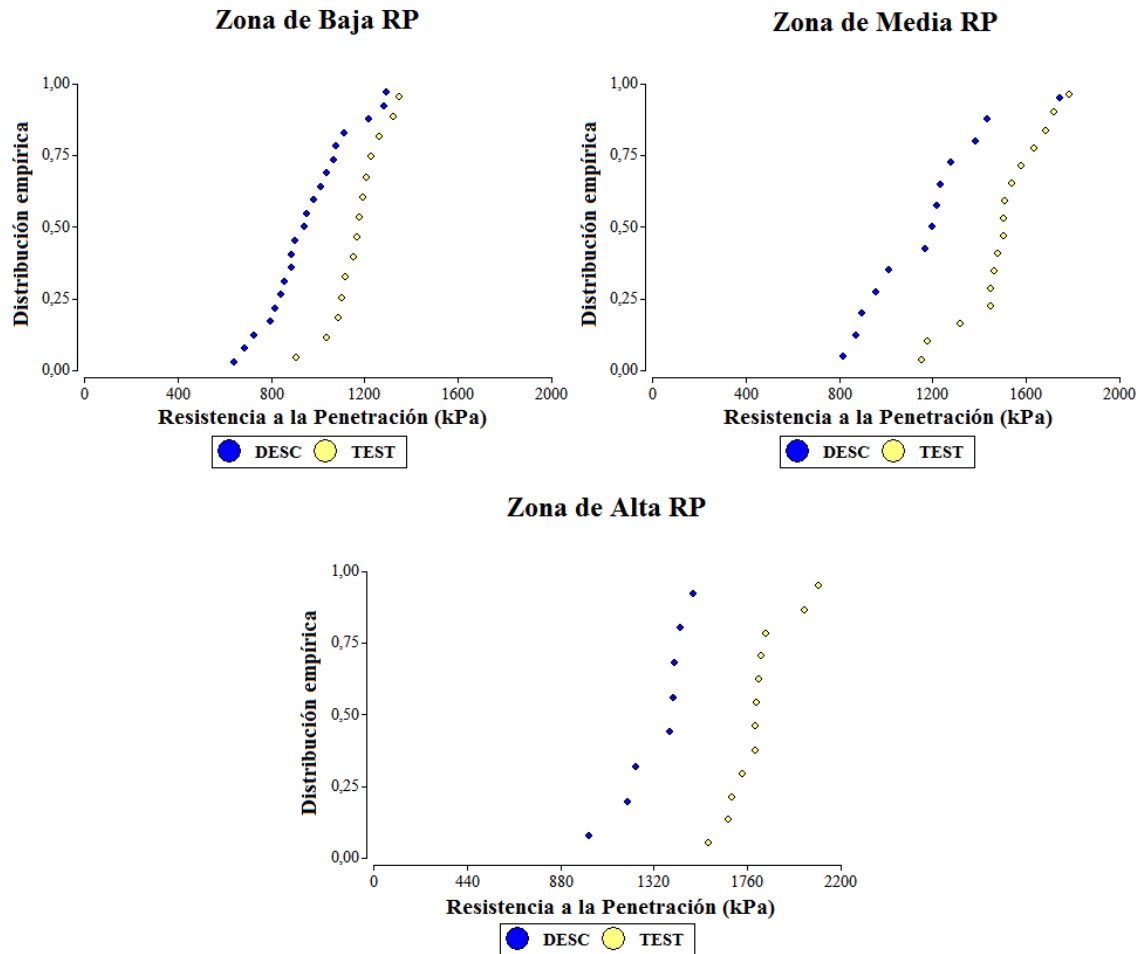


Figura No. 10. Distribución empírica de la resistencia a la penetración de 20–40 cm para las distintas zonas.

Para la zona de baja RP en ningún caso se llega al umbral de 1500 kPa. En la zona de media RP se observa que la probabilidad de obtener valores superiores a 1500 kPa se sitúa aproximadamente en 40% para el tratamiento testigo, en cambio para el tratamiento descompactado la probabilidad de obtener valores superiores a dicho nivel es inferior a 5%. La siguiente zona evaluada el tratamiento testigo pasó a tener 100% de

probabilidad de llegar a valores superiores a 1500 kPa, pero el descompactado aún se observan probabilidades menores a 5% de tener valores superiores a dicho nivel.

En el Cuadro No. 11 se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las variables medidas en planta para las diferentes zonas.

Cuadro No. 11. Comparación estadística de las variables medidas en planta según zona

Variable	Zona baja RP			Zona media RP			Zona alta RP		
	T	D	P-valor	T	D	P-valor	T	D	P-valor
Temp. hoja (C°)	23,5	21,6	0,001	23	22,6	0,281	23,4	23,9	0,391
Altura (cm/pl.)	83,6	86,6	0,193	94,3	96,3	0,632	85,1	97,4	0,001
No. nudos/tallo	14	14	0,622	15	14	0,005	13	13	0,807
No. vainas/pl.	53	58	0,476	38	41	0,576	46	40	0,250
NDVI	0,71	0,71	0,987	0,76	0,78	0,101	0,69	0,80	0,002
NT (%)	4,9	5,1	0,479	4,8	5,1	0,004	4,7	5,1	0,106
P (%)	0,7	0,6	0,855	0,7	0,6	0,160	0,5	0,7	0,077
K (%)	2,3	2,3	0,804	2,4	2,5	0,949	2,9	2,2	0,016
Peso 100 granos (g.)	16,9	16,9	0,773	17,2	17,6	0,184	17,7	18,1	0,255
Rend. (g/pl.)	17,2	17,9	0,723	12,2	12,8	0,671	14,9	12,9	0,253
Humedad grano (%)	11,9	11,7	0,004	11,7	11,6	0,106	11,9	11,3	0,001

T: testigo; D: descompactado; Temp. hoja: temperatura de hoja; NT: nitrógeno total; P: fósforo; K: potasio; Rend.: rendimiento por planta.

Valores de p-valor inferiores a 0,05 son diferentes significativamente ($p \leq 0,05$). Test: prueba t de student para muestras independientes.

La temperatura de la hoja presentó diferencias significativas en la zona de baja RP, a favor del descompactado. La altura de planta para la zona de alta RP fue mayor con el pasaje de la herramienta. El descompactado presentó mayores valores de NDVI para la zona de media y alta RP, lo que indica un efecto positivo en el desarrollo de la biomasa hasta inicios del período crítico.

El % de P en planta para la zona de alta RP no tuvo diferencias significativas pero el p-valor fue muy próximo a 0,05, por lo tanto se destaca esta tendencia a favor del descompactado, con un 40% superior.

El % de NT mostró diferencias significativas en las zonas de compactación intermedia, aumentando 6,3%, y en la de mayor compactación las diferencias no fueron significativas pero se reportó un aumento 8,5% con un p-valor de 0,106. Por el contrario el K disminuyó significativamente con el descompactado para la zona de mayor RP.

En cuanto al rendimiento por planta no presentó diferencias significativas en ninguna de las zonas.

4.5.2.2. Rendimiento medido mediante monitor

El rendimiento por hectárea presenta diferencias relevantes para la zona de media y alta RP (Cuadro No. 12).

Cuadro No. 12. Comparación estadística del rendimiento por hectárea dentro de zonas definidas por resistencia a la penetración del suelo.

Variables	Zona Baja RP			Zona Media RP			Zona Alta RP		
	T	D	p-valor	T	D	p-valor	T	D	p-valor
Rend. (Kg/ha)	3401	3403	0.978	3335	3576	0.002	1581	3072	0.069
n	132	192		178	122		12	4	

T: testigo; D: descompactado; n: número de observaciones; Rend.: rendimiento por hectárea.

Valores de p-valor inferiores a 0,05 son diferentes significativamente ($p \leq 0,05$).
Test: prueba t de student para muestras independientes.

Se puede observar que para la zona de baja RP no existen diferencias significativas, en cambio en la zona de RP media se visualizan diferencias aumentando 7,2% (241 Kg). Para la zona de alta RP las diferencias no fueron significativas al 5% pero si al 10% con un p-valor de 0,069, mostrando un incremento de 94,3% (1497 Kg) a favor del descompactado.

En la Figura No. 11 se muestra la distribución empírica del rendimiento por hectárea medido con el monitor.

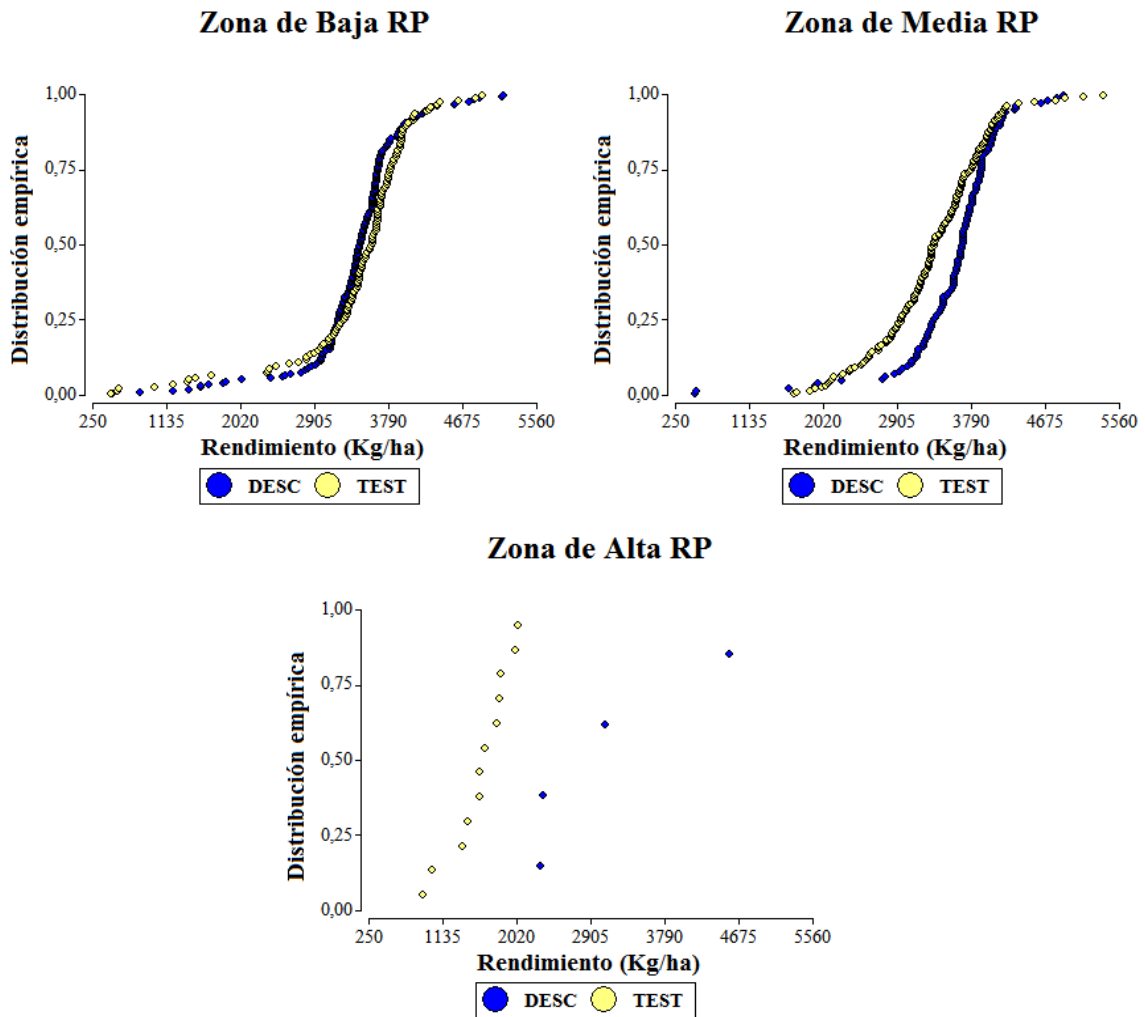


Figura No. 11. Distribución empírica del rendimiento por hectárea según zona

Para la zona de baja RP la probabilidad de obtener diferentes rendimientos no varía según el tratamiento, en cambio para la zona de media RP puede observarse que el tratamiento descompactado tiene 65% de probabilidad de alcanzar rendimientos superiores a 3500 Kg, mientras que para el tratamiento testigo la probabilidad de llegar a dicho rendimiento se sitúa en 40%. La zona de alta RP presentó las mayores diferencias, se puede encontrar en el tratamiento descompactado 100 % de probabilidad de obtener rendimientos superiores a 2100 Kg, mientras que para el testigo la probabilidad de obtener valores superiores a este rendimiento es nula.

5. DISCUSIÓN

En primera instancia se acepta la hipótesis principal planteada, en donde se ha conseguido exitosamente utilizar la RP para diferenciar zonas con compactación diferencial dentro del área experimental. La resistencia a la penetración en el estrato de 20 a 40 cm de profundidad, la que presentó mejor correlación espacial. Dicha zonificación ha permitido cuantificar una respuesta diferencial a la descompactación sub-superficial del suelo en el rendimiento de soja y otras variables medidas en planta y en suelo.

Sadras (2005) observó que la RP en los primeros 10 cm del suelo no superaba los 1000 kPa, y que en esta situación no se encontraba respuesta a la descompactación. En nuestro caso para los primeros 8 cm de profundidad obtuvimos resultados similares, a excepción de la zona de compactación media, donde se observaron diferencias significativas aún por debajo de los 1000 kPa.

Para la RP de las demás profundidades se encontraron diferencias significativas para todas las zonas. Siendo similares a los resultados obtenidos por Álvarez y Torres Dugan (2009) donde la resistencia disminuyó 37 y 24 % en las capas de 0-25 cm y 0-40 cm, respectivamente. Para nuestro caso en el estrato de 8-20 cm la magnitud del efecto del tratamiento fue creciendo a medida que aumentaba la compactación, tomando valores de 15,9, 21,8, y 23,9 % para las zonas de RP baja, media y alta respectivamente. Para el estrato de 20-40 cm la magnitud del efecto del tratamiento fue mayor para la zona de alta resistencia (26,5% de variación), y no tuvo grandes diferencias para la zona de resistencia baja e intermedia (18,2 y 17,1 % de variación).

Coincidiendo con el umbral establecido por Threadgill (1982), Lowery y Schuler (1991) para el buen crecimiento y desarrollo de las plantas, se encontraron respuestas en rendimiento a partir de la zona de compactación media con una RP promedio de 1444 kPa, siendo la respuesta mucho mayor cuando la RP entro en este umbral con un nivel promedio de 1806 kPa para la zona de alta compactación.

El rendimiento por hectárea medido a través del monitor presentó respuesta al tratamiento en las zonas de RP media y alta. Para la zona de resistencia media se observaron diferencias significativas en rendimiento por hectárea a favor del tratamiento descompactado de 7,2% (241 Kg), mientras que para la zona de alta resistencia se observó un incremento de 94,3% (1497 Kg). Por el contrario el rendimiento medido por

planta no presentó respuesta al tratamiento para ninguna de las zonas de compactación definidas. Dichos resultados podrían estar explicados por diferencias en implantación entre los tratamientos, lo cual ha sido revelado en otros estudios como uno de los principales efectos del tratamiento de descompactación sobre los cultivos (Martino 1998, Díaz-Zorita 2000, Ernst y Bentancur 2001). Esto generaría una mayor población y biomasa por unidad de superficie, la cual podría ser explicada con los mayores valores de NDVI encontrados. Como consecuencia de lo anterior se podrían obtener aumentos en la captura de radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Sadras, 2005) y el consiguiente incremento en rendimiento.

En relación a los nutrientes en suelo, se observaron diferencias significativas únicamente para la zona de mayor RP. Para el caso del P, el suelo presentó 18 ppm en los primeros 15 cm y el efecto del paraplow lo aumentó significativamente en 4,9 ppm (27,1%). El K presentó niveles de 1,07 meq/100g aumentando 0,21 meq/100g (19,6%) en los primeros 15 cm.

Las diferencias en altura de planta fueron marcadas únicamente para la zona de mayor resistencia, esto puede deberse coincidiendo con lo citado por Amézquita (1999) a que frente a las mayores compactaciones se ve afectado el tamaño de las plantas y restringe la elongación de los entrenudos.

En relación a los nutrientes medidos en planta el tratamiento descompactado presentó diferencias en la absorción de nutrientes frente al testigo, para el % N total aumentó 6,3% para la zona de RP media y 8,5% para la zona de RP alta. Para el caso del P el tratamiento descompactado aumentó 40% para la zona de alta RP. Dichos resultados son reafirmados por estudios realizados por Ishaq et al. (2001) donde encontraron que la compactación disminuye la absorción de N, P y K para trigo y sorgo. En nuestro caso para el K los resultados obtenidos son contrastantes con los de Ishaq et al. (2001) mostrando disminución para el tratamiento descompactado.

El aumento en absorción de los nutrientes podría estar dado por el mayor crecimiento de las raíces en suelos con menor RP (Ishaq et al., 2001). Los suelos más compactados pueden provocar una disminución en la captación de recursos (Lowery y Schuler, 1991), en esta situación se podría explicar que el tratamiento testigo tenga menores valores de N y P en planta.

6. CONCLUSIONES

La resistencia a la penetración es un indicador que permite identificar y definir zonas con distinta compactación del suelo, con respuesta diferencial del cultivo al tratamiento de descompactación sub-superficial.

El pasaje de paraplow provoca disminución en la resistencia a la penetración, dicha magnitud es mayor a medida que aumenta el grado de compactación original.

Los resultados sugieren que a partir de 1450 kPa de resistencia a la penetración es esperable obtener aumentos en rendimiento de soja por descompactación sub-superficial del suelo. Dicha respuesta es mayor a medida que se incrementan los niveles de resistencia a la penetración.

7. RESUMEN

El rubro agrícola es de gran importancia en la economía del Uruguay, contribuyendo en gran proporción al PBI nacional. Durante los últimos años la agricultura ha transitado un proceso de intensificación y se ha expandido hacia nuevas zonas, predominando los sistemas de producción con siembra directa y agricultura continua. Esta situación ha generado condiciones físicas restrictivas y procesos degradativos en la estructura del suelo, para los cuales se plantea como solución el aflojamiento mecánico del suelo con subsolador. Se plantea como objetivo principal utilizar la resistencia a la penetración como indicador a partir del cual se puedan definir zonas con diferente compactación dentro del área experimental, para posteriormente analizar en las mismas la respuesta del tratamiento de descompactación sobre diversas variables de suelo y planta. El estudio se realizó en el campo experimental de la Expoactiva en el departamento de Soriano (33.445710 y 33.448214 de latitud Sur y los meridianos 57.900426 y 57.902602 de longitud Oeste), durante los meses de octubre de 2014 hasta mayo de 2015. El ensayo tuvo un diseño de bloques completos al azar con dos tratamientos y tres repeticiones, los tratamientos testigo y descompactado se aplicaron sobre bloques que difieren entre sí en cuanto a característica de suelo y topografía. En cada parcela se definió una grilla para el muestreo compuesta de 14 puntos distribuidos de forma uniforme en el espacio, los cuales son tomados como referencia para mediciones de las distintas variables. Como resultado se puede destacar que se han encontrado áreas con elevada compactación, las cuales pueden ser identificadas por su resistencia a la penetración de 20-40 cm de profundidad, ya que es un buen indicador por poseer alta correlación espacial. En segundo lugar el pasaje de paraplow provocó una disminución en la resistencia a la penetración, dicha tendencia es mayor a medida que aumenta el grado de compactación original. El rendimiento por hectárea presentó respuesta al tratamiento en las zonas de resistencia a la penetración media (1444 kPa) y alta (1806 kPa). Para la zona de resistencia media se observaron aumentos de 7,2% (241 Kg), mientras que para la zona de alta resistencia el incremento fue de 94,3% (1497 Kg). Estos resultados muestran que la alternativa de la descompactación sub-superficial del suelo con paraplow podría ser una herramienta que viabilice el sistema actual de producción.

Palabras clave: Paraplow; No laboreo; Resistencia a la penetración.

8. SUMMARY

The agricultural area is of great importance in the economy of Uruguay, contributing to a great extent to the national GDP. In recent years, agriculture has come a process of intensification and has expanded into new areas, predominantly production systems of direct seeding and continuous agricultura. This situation has generated restrictive physical conditions and degradative processes in the soil structure, for which arises as a solution mechanical loosening the soil with subsoiler. It arises main objective use penetration resistance as an indicator from which can be defined with different compaction zones within the experimental area, and then analyze in the same areas of treatment response descompactación on various soil and plant variables. The study was conducted in the experimental field of Expoactiva in the department of Soriano (33.445710 and 33.448214 south latitude and meridians 57.900426 and 57.902602 west longitude), during the months of October 2014 through May 2015. The trial design was a randomized complete block with two treatments and three repetitions, and sub-superficial tillage control treatments were applied on blocks that differ in terms of soil and topography feature. In each plot a grid for sampling consisting of 14 points evenly distributed in space, which are taken as reference for measurements of different variables defined. As a result can highlight areas that have been found with high compaction, which can be identified by their resistance to penetration of 20-40 cm, as it is a good indicator for having high spatial correlation. Secondly the passage of paraplow causes a decrease in resistance to penetration, this tendency is greater with increasing the degree of the original compaction. The yield per hectare presents response to treatment in areas of intermediate penetration resistance (1444 kPa) and high (1806 kPa). For the intermediate area they increase 7.2% (241 Kg) were observed, while for the high resistance area increase was 94.3% (1497 Kg). These results show that the alternative of sub-superficial tillage with paraplow could be a tool that would facilitate the current production system.

Keyword: Paraplow; No tillage; Penetration resistance.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, C. R.; Torres Duggan, M.; Chamorro, E. R.; Taboada, M. A. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa; efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo*. 27(2): 159-169.
2. Amézquita, E.; Chávez, L. F. 1999. La compactación del suelo y sus efectos en la productividad de los suelos. In: Congreso Costarricense de la Ciencia del Suelo (11º., 1999, San José, CR). El reto es producir y competir. Costa Rica, s.e. p. irr.
3. Arbeletche, P.; Carballo, C. 2007. Dinámica agrícola y cambios en el paisaje. *Cangüé*. no. 29: 55-59.
4. Arvidsson, J.; Håkansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research*. 39(3): 175-197.
5. Bingham, I. J. 2001. Soil root canopy interactions. *Annals of Applied Biology*. 138(2): 243-251.
6. Blackwell, P. S.; Green T. W.; Mason W. K. 1990. Response of biopore channels from roots to compression by vertical stresses. *Soil Science Society of America Journal*. 54(4): 1088-1091.
7. Boone, F. R.; Van Der Werk, K. H.; Kroesbergen B.; Ten Hag, B. A.; Boers, A. 1986. The effect of compaction of the arable layer in Sandy soil on the growth of maize for silage. 1. Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 34: 155-171.
8. Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Rossato, H. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic in ten sites; effect of soybean (*Glycinemax* L.) yields. *Soil and Tillage Research*. 78(1): 53-58.

9. Carpenter, T. G.; Faussey, N. R.; Reeder, R. C. 1985. Theoretical effects of wheel loads on subsoil stresses. *Soil and Tillage Research*. 6: 179-192.
10. Cazorla, C. R.; Masiero, B. 2005. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. In: Díaz-Rosello, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 123-132.
11. Cholaky, C. G.; Cisneros, J. M.; Uberto, M. E.; Vignolo, C.; Giayetto, O. 2007. Degradación-recuperación de la condición hidrofísica de Haplustoles/udoles del sur cordobés manejados con siembra directa. In: Díaz-Rosello, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 97-108.
12. Cubilla, M.; Reinert, D. J.; Aita, C.; Reichert, J. M. 2002. Plantas de cobertura do solo; uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direta. *Plantio Direto*. 71: 29-32.
13. Danfors, B. 1974. Compaction in the subsoil. Uppsala, Swedish Institute of Agricultural Engineering. 91 p. (Report no. S 24).
14. Dejong-Hughes, J.; Moncrief, J. F.; Voorhees, W. B.; Swan, J. B. 2001. Soil compaction; causes, effects and control. (en línea). Morris, University of Minnesota. s.p. Consultado 2 oct. 2015. Disponible en <http://www.extension.umn.edu/agriculture/tillage/soil-compaction/index.html>
15. De Melo, V.; Melgar, R.; Vitti, G. 2011. Soja en Latinoamérica; fertilizando para altos rendimientos. Buenos Aires, Argentina, Agroeditorial. 180 p.
16. Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*. 11(3): 199-238.

17. Díaz-Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interaction on dry land corn (*Zea mays L.*) productivity. *Soil and Tillage Research*. 54: 11-19.
18. Elkins, C. B.; Van Sickle, K. 1984. Punching holes in plow pans. *Solutions*. 28: 38-41.
19. Ernst, O.; Bentancur, O. 2004. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de N-NO₃-en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia (Montevideo)*. 8(1): 29-40.
20. _____.; Siri, G. 2011. La agricultura en el Uruguay, su trayectoria y consecuencias. *In: Simposio Nacional de Agricultura (2º, 2011, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-163.*
21. Evans, S. D.; Lindstrom, M. J.; Voorhees, W. B.; Moncrief, J. F.; Nelson G. A. 1996. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research*. 38: 35-46.
22. García-Préchac, F.; Ernst, O.; Siri-Prieto, G.; Terra, J. A. 2004. Integrating no-till to crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*. 77(1): 1-13.
23. Gentile, R. M. 2002. Forages for soil improvement in Uruguayan cropping systems. Winnipeg, Manitoba, University of Manitoba. 94 p.
24. Glinski, J.; Lipiec, J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton, FL, CRC. 250 p.
25. Håkansson, I. 1985. Swedish experiment on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Use and Management*. 1(4): 113-116.
26. _____.; Voorhees, W. B.; Elonen, P.; Raghavan, G. S. V.; Lowery, B.; Van Wijk, A. L. M.; Riley, H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil

compaction and crop yield in humid regions with anual freezing. Soil and Tillage Research. 10(3): 259-268.

27. Harris, W. L. 1971. The soil compaction process. In: Barnes, K. K. ed. Compaction of agricultural soils. St. Joseph, Michigan, USA, American Society of Agricultural Engineers. pp. 9-44.
28. Hipps, N. A.; Hodgson, D. R. 1988. Residual effects of a slant-legged subsoiler on same soil physical conditions and the root growth of spring barley. The Journal of Agricultural Science. 110: 481- 489.
29. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2015. Estadística climatológica 1980-2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 nov. 2015. Disponible en <http://www.inia.uy>
30. Ishaq, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Ibrahim, M.; Lal, R. 2000. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan; 1. Soil physical properties and crop yield. Soil and Tillage Research. 1570: 1–9.
31. _____; Ibrahim, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Lal, R. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan; II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. Soil and Tillage Research. 60: 153–161.
32. Johnson, J. F.; Voorhees, W. B.; Nelson, W. W.; Randall, G. W. 1990. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. Agronomy Journal. 82: 973–979.
33. Kantolic, A. 2003. Bases funcionales de la determinación del rendimiento y manejo del cultivo de soja. In: Satorre, E. ed. El libro de la soja. Buenos Aires, s.e. pp. 31-44.
34. Larson, W. E.; Eynard, A.; Hadas, A.; Lipiec, J. 1994. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: Soane, B. D.; van Ouwerkerk, C. eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier. pp. 597-625.

35. Letey, J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Advances in Soil Science*. 1: 273-294.
36. Lowery, B.; Schuler, R. T. 1991. Temporal effects of subsoil compaction on soils strength and plant growth. *Soil Science Society of America Journal*. 55(1): 216–223.
37. Martino, D. 1997. Siembra directa en los sistemas agrícola ganaderos del litoral. Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 82)
38. _____.1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis Ph.D. Manitoba, Canada. University of Manitoba. 264 p.
39. _____.; Ponce de León, F. 1999. Canola; una alternativa promisorio. Montevideo, INIA. 98 p. (Serie Técnica no. 105)
40. _____.2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz-Rosello, R. ed. *Siembra directa en el cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 225-257.
41. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2014. Anuario estadístico agropecuario. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 11 set. 2015. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2014,O,es,0>
42. _____. DIRENARE. DSA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección Nacional de Recursos Naturales. División de Suelos y Aguas, UY). 2006. Compendio actualizado de información de suelos del Uruguay. Montevideo. Escala 1: 1000000. 1 disco compacto.
43. Molfino, J. 2013. Potencial agrícola, algunos cálculos para agricultura en secano. *Cangüé*. no. 33: 14-18.

44. Motavalli, P.; Stevens, W. E.; Hartwig, G. 2003. Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil and Tillage Research*. 71(2): 121-131.
45. Müller, M. M. L.; Ceccon, G.; Rosolem, C. A. 2001. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 25: 531-538.
46. Passioura, J. B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment*. 25(2): 311-318.
47. Porterfield, J. W.; Carpenter, T. G. 1986. Soil compaction; an index of potential compaction for agricultural tires. *Transaction of the ASAE*. 29(4): 917-922.
48. Pravia, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas; A) impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis MSc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
49. Radford, B. J.; Yule, D. F.; Mc Garry, D.; Playford, C. 2001. Crop responses topplied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil and Tillage Research*. 61: 157-166.
50. 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): 131-148.
51. Schaffer, R. L.; Johnson, C. E.; Koolen, A. J.; Gupta, S. C; Horn, R. 1992. Future research needs in soil compaction. *Transactions of the ASAE*. 35(6): 1761-1770.

52. Sawchik, J. 2007. Algunas restricciones físicas e hídricas para el crecimiento de los cultivos en Uruguay. In: Díaz-Rosello, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 165-169.
53. Taylor, J. H. 1987. A rationale for controlled traffic research. *Acta Horticulturae*. 210: 9-18.
54. Threadgill, E. D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transaction of the ASAE*. 25(4): 859-863.
55. Torbert, H. A.; Wood, C. W. 1992. Effects of soil compaction and water filled pore space on soil microbial activity and N losses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 23(11-12): 1321-1331.
56. Varsa, E. C.; Chong, S. K.; Abolaji, J. O.; Farquhar, D. A.; Olsen, F. J. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays L.*) root growth and production. *Soil Tillage Research*. 43: 219-228.
57. Wolkowski, R. P. 2000. Efficacy of deep tillage in Wisconsin. In: Wisconsin Crop Management Conference (2000, s.l.). Proceedings. Madison, WI, University of Wisconsin. Department of Soil Science. Extension Division. s.p.

10. ANEXOS

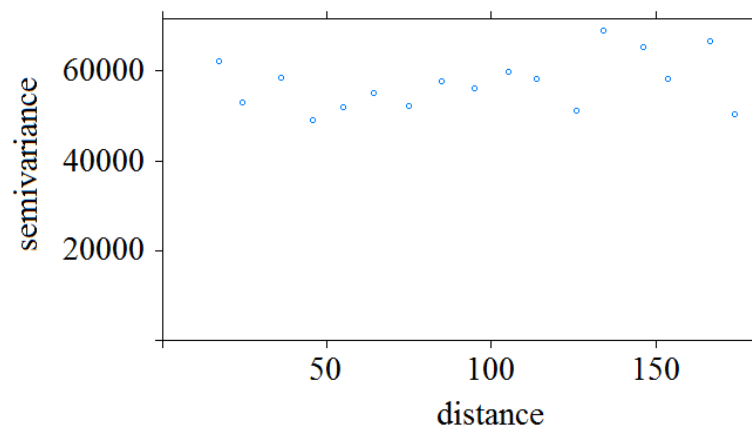
Anexo No. 1. Relación Nugget/Sill de la RP en sus diferentes profundidades

Variable	Nugget/Sill
RP 8-20 cm	75,6 %
RP 20-40 cm	0 %

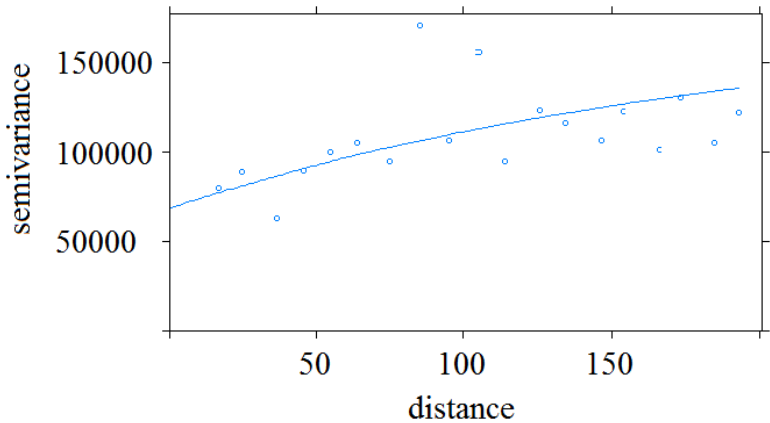
Anexo No. 2. Suma cuadrado del error de los modelos analizados para la variable RP de 20-40 cm

Modelo	Suma cuadrado del error	Nugget/Sill
EXPONENCIAL	94608302	0 %
MATERN	94608349	0 %

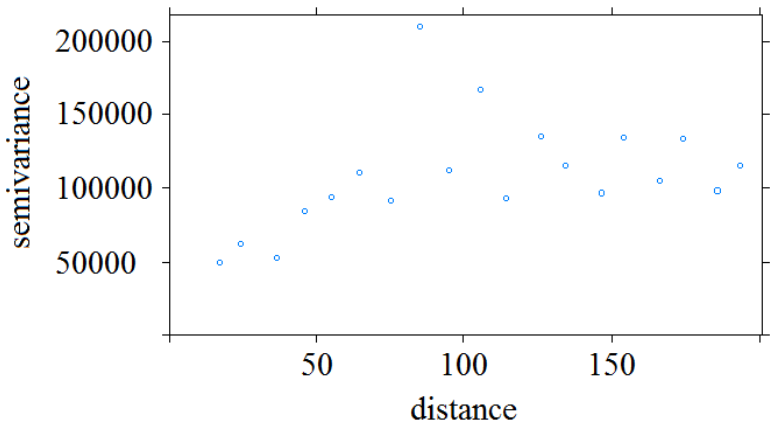
Anexo No. 3. Semivariograma de Resistencia a la penetración 0 – 8 cm.



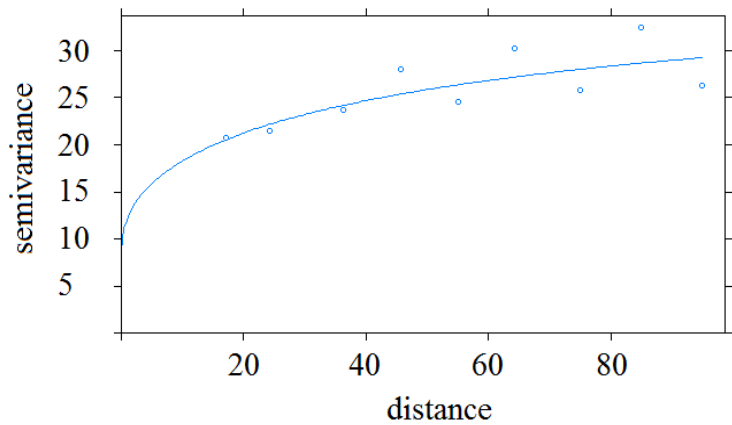
Anexo No. 4. Semivariograma de Resistencia a la penetración 8 - 20 cm



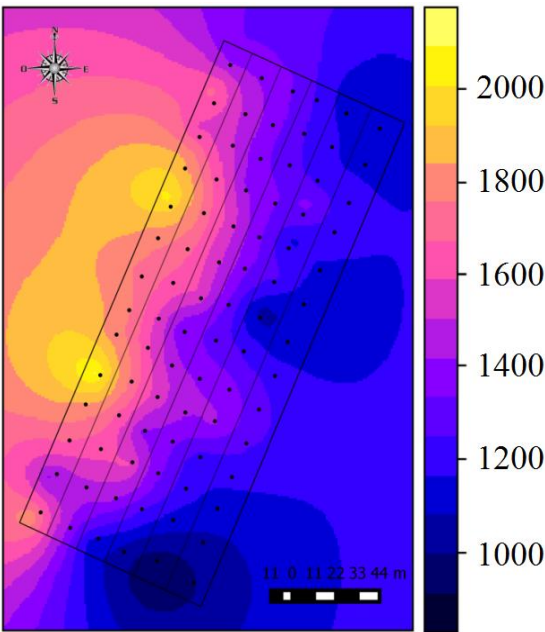
Anexo No. 5. Semivariograma de Resistencia a la penetración 20 - 40 cm



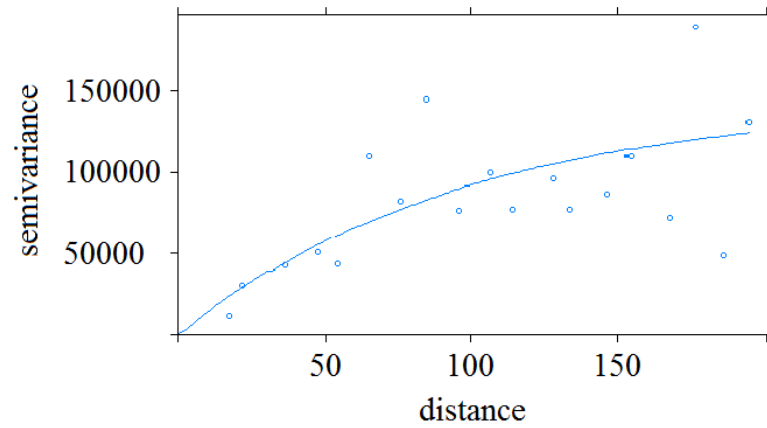
Anexo No. 6. Semivariograma de Rendimiento por planta



Anexo No. 7. Kriging de resistencia a la penetración 20-40 cm pre-tratamiento



Anexo No. 8. Semivariograma de Resistencia a la penetración de 20–40 cm pre-tratamiento



Anexo No. 9. Parámetros del semivariograma de resistencia a la penetración 20–40 cm pre-tratamiento

Parámetros	Valor
Rango (metros)	200
Nugget	0
Sill	143303,1
Relación Nugget/Sill	0