

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**IDENTIFICANDO ZONAS CON DIFERENTE COMPACTACIÓN  
SUBSUPERFICIAL EN BASE AL RENDIMIENTO DE MAÍZ E IMÁGENES  
SATELITALES**

**por**

**Alejandro SAN ROMÁN RINCÓN  
Joaquín SANTANA CÓCCARO**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2020**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst

-----

Ing. Agr. (PhD.) Guillermo Siri

-----

Ing. Agr. (Mag.) Nicolás Fassana

Fecha: 3 de julio de 2020

Autores: -----

Alejandro San Román Rincón

-----

Joaquín Santana Cocco

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias, a los amigos y novias, por el apoyo incondicional durante estos años de carrera.

A los productores, profesores y técnicos que estuvieron a disposición ante cualquier inquietud.

A Magui por las correcciones y recomendaciones.

A Ramiro Izaguirre por la colaboración en el trabajo de campo.

A Pilar Etchegoimberry por la ayuda en los cálculos estadísticos.

A Oswaldo Ernst por el apoyo durante toda la tesis.

A Sully Toledo por permitir, mediante sus correcciones, la presentación del trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1. DEFINICIÓN DE COMPACTACIÓN.....	3
2.2. ORIGEN Y CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN.....	3
2.2.1. <u>Factores naturales</u> .....	3
2.2.2. <u>Factores artificiales</u> .....	3
2.3. COMPACTACIÓN COMO LIMITANTE.....	4
2.4. LIMITANTE A NIVEL DE CULTIVOS.....	5
2.5. FORMAS DE ESTIMAR LA COMPACTACIÓN.....	6
2.6. MECANISMOS PARA REVERTIR LA COMPACTACIÓN.....	8
2.6.1. <u>Laboreo biológico</u> .....	8
2.7. PARAPLOW.....	9
2.7.1. <u>Resultados a nivel de suelo</u> .....	10
2.7.2. Resultados a nivel de cultivo.....	11
2.7.3. <u>Resultados de largo plazo</u> .....	12
2.8. ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTO MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	14
2.9. HIPÓTESIS.....	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	16
3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	16
3.2. ESTRATEGIA DE TRABAJO.....	16
3.3. MANEJO DEL SITIO Y EL CULTIVO DE MAÍZ.....	17
3.4. DETERMINACIONES.....	18

3.4.1. <u>A nivel del suelo (20/05/2016)</u> .....	18
3.4.2. <u>A nivel de cultivo</u> .....	18
3.4.3. <u>Cálculo de NDVI</u> .....	18
3.5. ANÁLISIS DE DATOS .....	19
3.5.1. <u>Análisis espacial de la compactación</u> .....	19
4. <u>RESULTADOS</u> .....	20
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AÑO .....	20
4.1.1. <u>Precipitaciones</u> .....	20
4.2. RESISTENCIA DE LA PENETRACIÓN.....	21
4.3. RESULTADOS A NIVEL DE CULTIVO .....	25
4.4. ÍNDICE VERDE NORMALIZADO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES.....	33
5. <u>DISCUSIÓN</u> .....	37
6. <u>CONCLUSIONES</u> .....	39
7. <u>RESUMEN</u> .....	40
8. <u>SUMMARY</u> .....	41
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	42

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

<b>Cuadro No.</b>	<b>Página</b>
1. Implantación (%) y largo de espiga (cm) según manejo.....	25
2. Rendimiento estimado (kg/ha) según grado de compactación .....	27
3. Comparación de rendimiento (kg/ha) todos contra todos, teniendo en cuenta el manejo y nivel de compactación (alta o baja).....	28
4. Comparación de largo de espiga según zona de rendimiento estimado .....	31

### **Figura No.**

1. Mecanismo por el cual descompactan distintos implementos de laboreo.....	9
2. Esquema representativo de bajo qué condiciones hay mayores probabilidades de obtener una respuesta positiva o negativa al uso del paraplow.....	12
3. Ubicación espacial de la grilla de muestreo indicando la zona descompactada (D) y el testigo (T) (a) sobre el mapa de elevación del terreno (b).....	17
4. Ubicación espacial de la grilla de muestreo indicando la zona descompactada (D) y el testigo (T) (a) sobre el mapa de elevación	

	del terreno.....	17
5.	Precipitaciones durante octubre 2015 – mayo 2016 en relación al período 1961 -1990.....	20
6.	Resistencia a la penetración según profundidad y manejo.....	21
7.	Desvío estándar de la resistencia a la penetración según manejo y profundidad de suelo.....	22
8.	Histograma de frecuencia de la compactación en profundidad.....	23
9.	Representación espacial de la compactación.....	24
10.	Frecuencias acumuladas en función del rendimiento (kg/ha).....	25
11.	Largo de espiga promedio en función de la resistencia a la penetración para dos manejos, D y T.....	26
12.	Mapa estimación de rendimiento.....	29
13.	Largo de espiga en función de la altura del terreno.....	30
14.	Mapas de NDVI del cultivo en distinto momento.....	32
15.	Relación entre ambas fechas de NDVI.....	33
16.	Síntesis de los distintos mapas elaborados .....	37

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia reciente la demanda por alimentos ha ido creciendo, según algunas proyecciones ésta, en el corto plazo seguirá al alza. Por lo tanto, el mundo debe ser capaz de producir más cantidad de alimentos. Para lograr esta meta se deben aumentar los rendimientos por unidad de superficie, puesto que, el área agrícola no puede crecer, ya que las tierras aptas se encuentran en uso en su mayor parte.

Si se quiere producir más por unidad de superficie se debe tener más eficiencia en el uso de los recursos para no deteriorarlos. Se han detectado consecuencias negativas sobre el suelo debido a las prácticas agrícolas actuales, entre las cuales se destaca la compactación del mismo.

Los cambios en la compactación del suelo impactan negativamente en las propiedades físicas y químicas del mencionado, comprometiendo su productividad. Ya en el año 1999 existían en el mundo 83 millones de hectáreas deterioradas por el proceso de compactación. De esta forma se reduce la capacidad global de producir alimentos.

Durante la última década, impulsada por excelentes precios de los commodities, la agricultura se ha intensificado y extendido hacia nuevas zonas, predominando los sistemas de producción con siembra directa y en agricultura continua. Este paquete tecnológico si bien tiene ventajas desde el punto de vista de la conservación de suelo respecto al laboreo convencional, genera un deterioro en su estructura, muchas veces por los factores propios como la textura, el clima húmedo además del frecuente tránsito de maquinaria y animales.

Los aumentos de los valores de resistencia a la penetración y densidad aparente en los sistemas de siembra directa, dan pruebas fehacientes de que generalmente se presentan fenómenos de compactación del suelo. Varios productores al estar al tanto de los problemas causados, deciden descompactar el subsuelo de forma mecánica, siendo que, esta tecnología es relativamente cara y demanda gran cantidad de energía. En Uruguay muestreos de suelo realizados por el INIA establecen que en el 50% de los casos se observa un alto valor de densidad aparente, dando indicios de que la compactación limita el potencial productivo de los suelos.

## 1.1. OBJETIVOS

Vistos los problemas generados por la agricultura convencional, los productores buscan soluciones, entre otras surge el paraplow como método de “aflojar” los suelos que se han ido compactando. Esta tarea es muy costosa energéticamente, es de dudosa respuesta, y aún más dudosa residualidad en el tiempo. Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- a) Identificar zonas con rendimiento de maíz diferencial a partir de datos recabados a nivel de chacra sobre rendimiento del cultivo y su asociación con la compactación subsuperficial del suelo.
- b) Estudiar la posibilidad de identificar estas zonas utilizando información de imágenes remotas del mismo cultivo.
- c) Evaluar el efecto residual del laboreo vía paraplow tanto en compactación como en rendimiento.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DEFINICIÓN DE COMPACTACIÓN

La compactación es la compresión de suelos no saturados (Braford y Gupta, 1986). Durante el proceso de compactación hay expulsión de aire del suelo deteriorando las propiedades fisicoquímicas del mismo.

### 2.2. ORIGEN Y CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN

Existen diversos factores que generan compactación de un suelo. Los mismos se pueden clasificar en dos grandes grupos: naturales y artificiales.

#### 2.2.1. Factores naturales

Dentro de este grupo se encuentra como principal agente compactador al impacto generado por las gotas de lluvia sobre el suelo. El efecto de las mismas puede generar una capa compactada en la superficie del suelo de hasta 1,25 cm lo cual es suficiente para causar complicaciones en la emergencia de la plántula (Dejong-Hughes et al., 2001).

Otro motivo que incide en la compactación del suelo es el pisoteo que ejercen los animales en condiciones de humedad. Estudios realizados por Taboada et al. (1988) demuestran un cambio significativo en la densidad aparente del suelo en condiciones de pastoreo y de no pastoreo. Según Martino (1994) este factor es uno de los más frecuentes en Uruguay junto con el tráfico de maquinaria en condiciones de humedad.

#### 2.2.2. Factores artificiales

Un factor clave en el proceso de compactación de suelo es la rotación que el productor decida. Es decir, si incluye pasturas perennes o no, el número de cultivos por año, si hay cultivos de cobertura, la especie o especies a sembrar. Las pasturas perennes contrarrestan en gran medida la compactación debido a su gran producción de raíces en comparación con especies anuales. Además, a mayor intensidad de cultivos, mayores son las labores a realizar con maquinaria pesada. En trabajos realizados en INIA La Estanzuela demuestran las diferencias en compactación debido a distintas rotaciones (García et al., 1979).

En Uruguay el tráfico de maquinaria en condiciones de humedad es considerado el principal agente compactador en sistemas bajo siembra directa (Martino, 1994). En este tipo de sistemas la maquinaria suele ser más pesada por lo que el riesgo de causar compactación es mayor. En clima templado, los

sistemas de siembra directa demostraron una caída en la porosidad del suelo y por lo tanto un aumento en la densidad aparente al ser comparados con el mismo suelo en labranza reducida (Díaz Zorita 2000, Botta et al. 2010).

Según Wolkowski (2000) la ausencia de patrones para circular al realizar las labores agrícolas empeora la situación ya que año a año se circula por distintos sitios de la chacra que no estaban compactados. En sitios donde no se realiza siembra directa, las secuencias de laboreo tras laboreo a una misma profundidad generan una capa subsuperficial compactada, también llamada suela de arado, la cual limita la exploración radicular y la infiltración de agua en el perfil (Dejong-Hughes et al., 2001).

### 2.3. COMPACTACIÓN COMO LIMITANTE

La compactación deteriora las propiedades del suelo afectando negativamente su productividad. A continuación se comentarán los principales detrimentos del suelo como consecuencia de la compactación.

La disminución de la porosidad total (Amézquita y Chávez, 1999), afecta la dinámica del agua, disminuyendo la conductividad hidráulica (Dawidowski et al., 1987), bajando la tasa de infiltración (Mandal, 1984) y reduciendo la capacidad de almacenaje de agua disponible en el suelo (Radford, 2001). Por otra parte, al disminuir la capacidad de almacenaje de agua disponible, el suelo queda más expuesto a posibles anegamientos con menores cantidades de agua (De San Celedonio et al., 2014). Al reducirse los macroporos, el agua es retenida con mayor fuerza, no quedando disponible para las plantas una fracción importante de la misma. También al reducirse la tasa de infiltración, aumenta la tasa de escurrimiento desaprovechando el agua que potencialmente podría ingresar al suelo y aumentando el riesgo de erosión.

El aumento en la densidad aparente del suelo y de la resistencia a la penetración, reduce la exploración radicular y por lo tanto la capacidad de absorción de recursos como nutrientes y agua (Ishaq et al., 2000). Asimismo también reduce la resistencia al vuelco (Martino, 1994). Threadgill (1982) afirma que a partir de valores en torno a los 1500 kPa se comienza a afectar el desarrollo radicular y a partir de los 2000 kPa el crecimiento radicular puede detenerse.

Cuando la porosidad se ve disminuida por la compactación (los macroporos en mayor medida), esto afecta directamente la capacidad de intercambio gaseoso del suelo, además del porcentaje de aire del mismo. Por lo tanto aumenta el riesgo de hipoxia y anoxia, es decir bajos niveles de oxígeno (Martino, 1994). Como consecuencia de la baja eficiencia energética de la

respiración anaeróbica, la disponibilidad de energía para las plantas se ve drásticamente reducida (Vartapetian, 1993). Según Cannell y Jackson, citados por Martino (1994) el oxígeno es el aceptor final de electrones en el proceso respiratorio de los suelos. Cuando ocurren excesos de humedad, el oxígeno se consume rápidamente, y los electrones son capturados por otros aceptores. Esto trae como consecuencia la acumulación de ácidos orgánicos, metano, etileno, entre otras sustancias, que resultan tóxicas para las plantas.

Según investigaciones guiadas por Torbert y Wood (1992) a medida que aumenta la densidad aparente de  $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$  a  $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$  se reduce en un 65% la tasa de respiración microbiana al 60% de espacio de poros lleno de agua. Por lo tanto al reducirse la actividad microbiana también lo hacen los procesos que dependen directamente de ella, como la mineralización de nitrógeno, descomposición de materia orgánica, etc.

La disminución en la absorción de distintos nutrientes se ve afectada por varios factores. Por un lado disminuye la actividad microbiana, por lo que hay menor mineralización de nutrientes. También hay menor exploración radicular, lo que disminuye la absorción de los nutrientes poco móviles como el fósforo. Por último se ve disminuida la conductividad hidráulica, reduciendo así el flujo masal, principal vía por la que se absorben algunos nutrientes como el nitrógeno (Glinski y Lipiec, 1990). Parish (1971) propone el uso del índice N/P en planta como el mejor indicador de la influencia de la compactación en la absorción de nutrientes.

#### 2.4. LIMITANTE A NIVEL DE CULTIVOS

Como consecuencia directa de los impactos negativos de la compactación sobre las propiedades físico-químicas-biológicas, se deteriora la productividad de los cultivos, no pudiendo explotar la potencialidad de esos suelos.

Vepraskas (1988) afirma que a partir de 1500 KPa comienza a restringirse el crecimiento radical y que a partir de una densidad aparente de  $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ , la compactación, en combinación con la textura, puede generar restricciones para el crecimiento radicular a tensiones de humedad de 100 KPa. Hadas y Stibbe (1997) indicaron que bajos niveles de emergencia se producen en condiciones de suelo muy seco, muy húmedo o muy duro y, en general, el proceso de germinación es más rápido y completo con densidades aparentes de  $1,2 \text{ Mg}$  o menores y con valores de resistencia a la penetración menores de 1400 KPa.

Estudios experimentales han demostrado también que la germinación, la elongación de las raíces, la elongación del coleoptile y la emergencia del trigo pueden ser afectadas con estrés en la interfaz mayor a 3000, 2300, 1700 y 800 KPa, respectivamente (Collis-George y Yoganathan, 1985)

En relación con los efectos adversos de inadecuadas condiciones físicas del suelo para el desarrollo del sistema radicular, Threadgill (1982) indicó que registros de 2 a 2,5 MPa son capaces de detener el mismo. Carter (1988) mencionó también que valores de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces. En relación con la densidad aparente, Vehimeyer y Hendrickson (1948) determinaron que valores de 1,46 Mg m<sup>-3</sup> constituyen el umbral crítico para el desarrollo radicular de gramíneas, mientras que Daddow y Warrington (1983) establecieron que 1,65 Mg m<sup>-3</sup> es el umbral de crecimiento radical.

En Uruguay en los trabajos llevados a cabo en INIA, donde se prueban distintas rotaciones que derivan en distintos grados de compactación García Préchac et al. (1979) obtuvieron una correlación negativa entre grado de compactación y rendimiento. Mientras que Martino (1998) obtuvo respuestas en rendimiento al descompactar vía paraplow de 102, 36, 29, y 14% en maíz, girasol, cebada y trigo respectivamente. Estas respuestas en rendimiento son mayores a las encontradas en la bibliografía a nivel mundial.

## 2.5. FORMAS DE ESTIMAR LA COMPACTACIÓN

Es importante reconocer si el proceso de compactación existe o no para luego poder tomar medidas al respecto. Para determinar si existe compactación se pueden utilizar métodos sensoriales (caseros) así como métodos analíticos.

Dentro de los métodos sensoriales que permiten saber si se está frente a un problema de compactación, se encuentra el observar la presencia de raíces poco profundas o extendidas horizontalmente. Esto induce a pensar que se está frente a un fenómeno de compactación sub-superficial. La probabilidad de estar frente a un problema de compactación sub-superficial aumenta si el suelo presenta una larga historia agrícola u otros indicadores sencillos como resistencia al tacto, resistencia a la penetración de un cuchillo. También existen plantas que dan indicios de compactación por ejemplo *Sporobolus indicus* y *Cenchrus echinatus* la cual suele aparecer en lugares de alta compactación.

Si bien se puede estimar el grado de compactación de suelo sensorialmente, la información no permite cuantificar la magnitud del proceso. Igualmente sirve como aproximación sencilla, pudiendo luego confirmarlo mediante los métodos analíticos.

Para confirmar si existe una resistencia a la penetración elevada que influya en el desarrollo y crecimiento de las plantas, afectando así el rendimiento, se deben utilizar métodos analíticos como cálculo de densidad aparente (en unidades de densidad) o resistencia a la penetración (tanto en unidades de presión (ejemplo, kPa) como en unidades de energía (ejemplo, julios/cm)) según el caso.

Según Sasal et al. (2017) incluso estas variables medibles deben ser analizadas con cuidado ya que, son variables que varían en el tiempo según algunos parámetros como humedad, estado del cultivo, por lo que medir en un solo momento lo que está pasando en un suelo puede no reflejar la realidad del suelo.

Con respecto a la densidad aparente, existe mucha información generada al respecto. Tasistro et al. (2018) generaron valores de referencia para distintas texturas de suelo, desde las más livianas a las más pesadas. Por ejemplo, para un suelo de textura franco arcillo limosa no existirían restricciones para las raíces por debajo de  $1,1 \text{ Mg/m}^3$  mientras que valores por encima de  $1,49 \text{ Mg/m}^3$ , ya afectarían el crecimiento de las mismas. A partir de  $1,58 \text{ Mg/m}^3$  se restringe completamente la capacidad de las raíces de penetrar en el perfil. Lógicamente hay especies más adaptadas que otras a la compactación. Si bien esta variable es de gran utilidad, no se tomó como variable experimental debido a la complejidad de su medición en tantos puntos de muestreo y a distintas profundidades.

También se puede estimar la compactación calculando la energía requerida para penetrar a lo largo del perfil. Esto se realiza con un penetrógrafo dinámico, el cual deja caer un peso en una distancia constante y estima la energía cinética requerida para penetrar en el perfil. A mayor energía mayor es la compactación.

Por último, la resistencia a la penetración es un método analítico muy utilizado debido a su practicidad ya que permite obtener la resistencia a la penetración en gran parte del perfil, de forma sencilla, pudiendo así muestrear varios puntos en poco tiempo. Para estimar este parámetro se utiliza el penetrógrafo estático, que mide la fuerza requerida para empujar el instrumento a través del perfil de suelo (cone index), y expresa la fuerza requerida por área.

Con respecto a los valores de referencia, Threadgill (1982), Vepraskas (1988) y posteriormente Jorajuría et al. (1997) afirman que a partir de  $1,5 \text{ MPa}$  comienza a restringirse el crecimiento radicular, deteniéndose por completo una vez que alcanzan los  $2,5 \text{ MPa}$  (Threadgill, 1982). Por otra parte, Taylor y

Gardner (1963) confirman que existen reducciones en el crecimiento de las raíces a partir de 1,31 MPa y un cese del crecimiento a partir de 2,9 Mpa.

## 2.6. MECANISMOS PARA REVERTIR LA COMPACTACIÓN

En la actualidad existen principalmente dos mecanismos para descompactar un horizonte subsuperficial que se encuentre compactado, el laboreo mecánico, principalmente a través del uso del paraplow y el laboreo biológico en el cual se promueve el crecimiento de algunas especies con alta capacidad de exploración del suelo a través de sus raíces.

### 2.6.1. Laboreo biológico

Según Martino (1997) el laboreo biológico consiste en explotar la habilidad de ciertas especies para desarrollar raíces en condiciones de alta compactación. Esto generaría un sistema de canales en el suelo que permitiría el crecimiento de las raíces de especies sensibles a la compactación. Dexter (1991) propuso el término laboreo biológico para describir este proceso.

Según estudios de la FAO (2002), los canales generados por las raíces, tienen mucha estabilidad y perduran en el tiempo, por lo que es una solución a largo plazo. Aparentemente, dicha estabilidad se explicaría en que los canales son predominantemente verticales, y por lo tanto, no serían sellados por procesos de compactación (pisoteo, tráfico de maquinaria, etc.); y por otra parte, en que la compactación localizada causada por el crecimiento radial de las raíces confiere cohesión a las paredes del canal, haciendo más difícil su destrucción (Martino, 1998).

Como principal desventaja en esta forma de descompactar el suelo es que son procesos biológicos, los cuales llevan tiempo. Las especies perennes son las que generan mayor proporción de raíces. Se necesitan varios años sin realizar agricultura para que biológicamente se pueda descompactar un suelo que se encuentre muy compactado. Según Tourn et al. (2013) existe mucha incertidumbre en la respuesta esperada del uso del laboreo biológico. Por otro lado, hay un consenso en la bibliografía de que la estabilidad de la descompactación biológica es mucho más alta, perdurando en el tiempo (Renger 1974, Kautz et al. 2013).

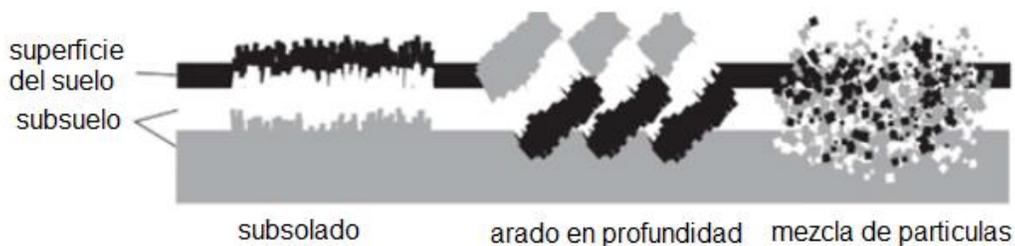
Actualmente se ha expandido el uso de cultivos de cobertura con distintos objetivos, desde aportes de nitrógeno a través de leguminosas, como mejora en las propiedades físicas del suelo (incluyendo la compactación). Diferentes especies son seleccionadas de acuerdo al objetivo a cumplir. Con respecto a las especies que tienen influencia en la descompactación del suelo,

Martino (1997) reporta que *Medicago sativa* (alfalfa), *Brassica rapa*, *Melilotus alba* y *Lupinus* sp, tienen un comportamiento adecuado para el laboreo biológico.

Otro aspecto vinculado con los beneficios en las propiedades físicas del suelo aportadas por el “laboreo biológico”, que está más que comprobado en experimentos de largo plazo aquí en Uruguay, es la rotación con pasturas luego de la fase agrícola. Estos experimentos demuestran las ventajas de incluir pasturas, ya que estas disminuyen el valor de densidad aparente, descompactando el suelo, además de que ayudan a mantener niveles elevados de materia orgánica, la cual es clave para lograr una buena estructura y fertilidad de suelo (García Préchac et al., 1979).

## 2.7. PARAPLOW

El paraplow es una herramienta de subsolado, similar a un cincel, desarrollada en Inglaterra. Esta trabaja a una profundidad de entre 30 - 50 cm, manteniendo la cobertura vegetal, con todos los beneficios que esto conlleva. De esta forma, a diferencia de las otras alternativas de laboreo, no invierte el suelo y evita dejar en profundidad gran parte de la materia orgánica del suelo.



En la imagen se representa el mecanismo por el cual descompactan distintos implementos de laboreo, el paraplow corresponde a la imagen de la izquierda.

Figura No. 1. Mecanismo por el cual descompactan distintos implementos de laboreo

Fuente: tomado de Schneider et al. (2017).

Existen estudios sobre los resultados del uso de esta herramienta, tanto a nivel mundial como regional e incluso local, donde no está del todo clara la respuesta, ya que son sistemas complejos donde intervienen muchos factores que generan interferencias en los resultados, dentro del universo de factores se pueden nombrar, textura de suelo, cultivo, clima, efecto año, fertilización, grado de compactación inicial, entre otras. Es clara entonces la dificultad del análisis

de esta tecnología, no existiendo una receta ni coeficientes técnicos muy precisos sobre los resultados.

### 2.7.1. Resultados a nivel de suelo

Existe una cantidad importante de experimentos de los efectos del paraplow sobre las propiedades físicas del suelo, encontrando una amplia diversidad de resultados y si bien los resultados tienden a ser positivos existe una cantidad importante con resultados negativos. Son variables complejas de medir y hay muchos factores que intervienen en los resultados, a continuación se abrirá un poco ese abanico de resultados de forma de concluir cómo interactúa esta herramienta en función de distintos factores.

Experimentos a largo plazo llevados a cabo en Alemania demostraron que el laboreo en profundidad disminuyó la densidad aparente y aumentó la macroporosidad del suelo, solo si este contenía más de 20% de arcilla y menos de 70% de arcilla (Borchert y Graf, 1985). Aquí se observa una clara interacción entre la tecnología y el tipo de suelo. Renger (1974) concluyó que en suelos con una relación Arcilla/Limo  $<0,3$  el subsolado tiene efectos perjudiciales en la estructura natural del suelo y tienden a compactarse en lugar de descompactarse, consistentemente con los experimentos de Borchert y Graf (1988) sobre la interacción de la textura de suelo con el laboreo subsuperficial.

Según estudios realizados por Martino (1998) en Uruguay, los principales resultados del uso de esta herramienta recaen en la capacidad de infiltración de los suelos, logrando una mayor precipitación efectiva y un menor escurrimiento. Los suelos agrícolas, parecen ser un buen blanco para esta tecnología, ya que son suelos que en general tienen altos niveles de arcilla. Otros estudios en Uruguay encontraron que en suelos con suela de arado, la disrupción mecánica de dicha barrera en el perfil parece ser un paso crítico para iniciar una rotación de cultivos exitosa (Pérez Gomar y García Préchac, 1993).

Parece haber un consenso internacional, que el principal beneficio de esta herramienta se da cuando existe una capa de suelo restrictiva para el crecimiento de las raíces, Schneider et al. (2017) en un meta análisis de experimentos con paraplow a nivel mundial, concluyeron que la principal característica que influye en la respuesta productiva de dicha herramienta es justamente la existencia de una capa compactada.

Del mismo análisis surgen las circunstancias donde existe mejores respuestas, en orden de importancia: capa restrictiva para el crecimiento radicular, luego la fertilización en profundidad y por último, parece ser que cuanto

más intensas las lluvias existen mayores beneficios y existen efectos negativos cuando el suelo es limoso y cuando llueve mucha cantidad.

Sobre esos resultados, Schneider et al. (2017), deducen que, la descompactación en profundidad permitiría alcanzar los nutrientes que fueron agregados en profundidad por parte de las raíces. También deducen que las lluvias intensas favorecen la respuesta de esta tecnología, dando un claro indicio que se modificaron algunas propiedades hídricas, principalmente capacidad de infiltración y capacidad de almacenaje total. En escenarios donde la lluvia es abundante, no se expresa esa mayor eficiencia en el uso del agua ya que deja de ser la limitante principal, no observándose beneficios de esta tecnología e incluso existiría una tendencia de efectos negativos.

### 2.7.2. Resultados a nivel de cultivo

Como efecto del uso del paraplow a nivel de suelo, se puede concluir que el laboreo en profundidad con dicho elemento tendrá efectos en el cultivo que se siembre posteriormente.

En primer lugar, Martino (1998) observó que luego de aplicar el tratamiento de descompactación vía paraplow, la densidad de plantas aumentó en un 56% para maíz, 22% para cebada y 14% para trigo. Esto puede explicarse por una reducción de la resistencia a la penetración, así como también por un aumento en la absorción de nutrientes. Zhao et al. (2013) observaron que en maíz hubo un notorio aumento en la absorción de nitrógeno, fósforo y potasio.

Con respecto al rendimiento, Martino (2001) observó una respuesta positiva en 11 de los 14 experimentos que realizó, siendo en promedio 102, 36, 29, y 14% más en maíz, girasol, cebada y trigo, respectivamente

Sene et al. (1985) concluyeron que el incremento en rendimiento en maíz por efecto del paraplow está relacionado directamente con la textura del suelo.

Esto coincide con lo que plantean Vepraskas y Miner (1986), Harrison (1994), Sojka et al. (1997) quienes observaron un aumento en la conductividad hidráulica luego del subsolado, con su consiguiente aumento de longitud de raíces y densidad de las mismas, aumentando significativamente el rendimiento del cultivo.

Posteriormente Álvarez et al. (2009) afirman que, las principales propiedades edáficas que explican el aumento en rendimiento del maíz son la

tasa de infiltración y la resistencia a la penetración. Con la variación de éstas, en distintos tipos de suelos, el rendimiento aumentó un 5,5% en promedio.

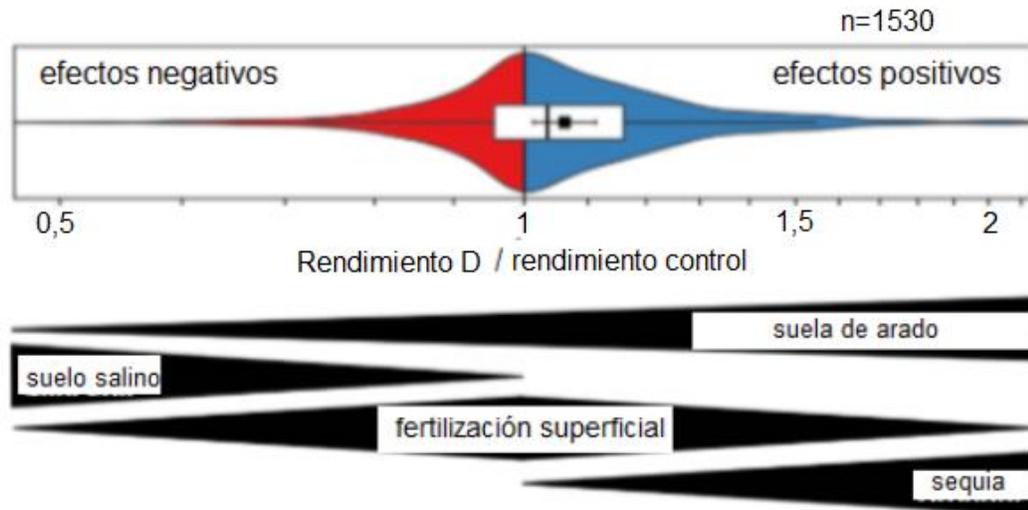


Figura No. 2. Esquema representativo de bajo qué condiciones hay mayores probabilidades de obtener una respuesta positiva o negativa al uso del D

Fuente: tomado de Schneider et al. (2017).

Para finalizar, en el metanálisis liderado por Schneider et al. (2017) para 45 experimentos, se puede observar como el rendimiento del cultivo se ve afectado principalmente por el contenido de agua y por la resistencia a la penetración creado por una capa restrictiva como puede ser una suela de arado. De los experimentos se destaca que solamente en 4 de ellos se obtuvieron resultados negativos y en 33 de ellos el uso del paraplows repercutió de forma positiva.

### 2.7.3. Resultados de largo plazo

Según Schneider et al. (2017), quienes realizaron un metanálisis sobre la descompactación a largo plazo, la bibliografía es bastante difusa con resultados muy diversos, desde casos donde el suelo se re compacta en días, hasta casos de experimentos donde el efecto perdura por varios años, incluso hay reportes donde el suelo se re compacta tanto que llega a un estado de compactación mayor que el inicial.

Por un lado, Sojka et al. (1997), trabajando en un suelo franco arenoso encontraron que la consolidación ocurrió dentro de un período de 27 días después del subsolado, produciéndose después de una lluvia, y todos los signos

del subsolado habían desaparecido al final de la estación del cultivo. A su vez Vepraskas et al. (1988) encontraron que el efecto residual del subsolado sobre el crecimiento de raíces, se mantenía alrededor de los dos años posteriores a la labranza, para desaparecer al tercer año por efecto de la re compactación. Estos autores sostienen, además, que el beneficio máximo de la labranza profunda, sobre los rendimientos, ocurrió cuando la misma se realizó anualmente, coincidiendo con lo postulado por Busscher et al. (1986) quienes plantean que el efecto del subsolado se manifiesta en las etapas tempranas del crecimiento de las raíces de cultivos, ya que posteriormente se produce la re compactación de las capas aflojadas.

Álvarez et al. (2009) no observaron efectos residuales de la descompactación sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento de los cultivos subsiguientes al maíz. Los resultados indican que la descompactación produjo efectos positivos de corto plazo sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento maíz pero no se observó efecto residual sobre el/los cultivo/s subsiguientes.

Por otro lado, Karlen et al. (1994) sugirieron que dos o tres años de subsolado, generarían una fragmentación estable de la capa laboreada, lo que podría proveer, a largo plazo, efectos benéficos para el crecimiento de cultivos, sin necesidad de subsolar anualmente.

Carter et al. (1997) estudiaron la persistencia de la labor de aflojamiento bajo condiciones de mínimo tráfico vehicular. Encontraron que la re compactación, de las capas aflojadas, ocurrió dentro de los tres años posteriores a la labranza, iniciándose durante el primer año después de la misma. Estos mismos autores sostienen además que los cambios periódicos que ocurren en la geometría porosa como resultado de ciclos de humedecimiento - secado, congelamiento - deshielo, podrían favorecer el proceso de re consolidación.

Grass (1971), Soane et al. (1987), Botta et al. (2006a), Baumhardt et al. (2008) coinciden en el aspecto que el tráfico acelera la recompactación posterior. Borchert y Graf (1988) encontraron que la estabilización de la estructura lograda a través del laboreo mecánico estaba influida de forma positiva por la abundancia de anélidos, por lo que manejos que promuevan los mismos, favorecen a capitalizar los beneficios del laboreo.

Según Bechtle (1985), el laboreo en profundidad previo a cultivos perennes, como en vides y otros frutales tiene una larga historia entre los productores. Esta técnica parece ser una tradición de generación en generación de los productores, ya que en el metanálisis liderado por Schneider et al. (2017), el único experimento científico sobre un cultivo perenne era uno sobre caña de

azúcar en Puerto Rico, no existiendo información robusta sobre la re compactación en cultivos perennes.

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. Las mayores residualidades se observaron en chacras que habían sido pastoreadas con altas dotaciones de ganado (FAO, 2002).

## 2.8. ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTO MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

La posibilidad de contar con herramientas alternativas para un monitoreo a distancia de la chacra permite en algunos casos estimar con cierta precisión cuál será el rendimiento del cultivo.

El indicador más utilizado por su relativa sencillez para ser calculado es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, su sigla en inglés). Este se calcula mediante la superposición de bandas contenidas en una imagen satelital, que varían entre sí por sus longitudes de onda.

Es una herramienta de estimación indirecta de la biomasa relativa de un cultivo y es muy usada en todo el mundo para seguimiento de sequías, supervisión de la producción agrícola, predicción de zonas con riesgo de incendio, etc. (Lillesand, 2004). Su cálculo se realiza de la siguiente manera:  $NDVI = (NIR - R_{vis}) / (NIR + R_{vis})$ , donde NIR corresponde a la banda que contenga al Infrarrojo Cercano y  $R_{vis}$  el rojo visible.

El intervalo de valores que se puede obtener en el cálculo de este indicador va desde -1 a 1, siendo los valores menores a 0, asociados a excesos de agua. Los valores en torno a 0,3 representan la rocosidad y a medida que el valor aumenta, representa aumentos en la vegetación.

Cittadini et al. (2016) observaron correlaciones positivas entre NDVI y rendimiento en maíz, pero menores a 0,5. Esto puede deberse a que, si bien es una medida de fácil cálculo, presenta ciertas limitaciones como saturación, efectos atmosféricos, efectos del suelo, etc. Sin embargo, también permite diferenciar vegetación en cantidad y tipo, por lo que puede tomarse como un buen indicador para estimar rendimientos (Lillesand, 2004).

Sin embargo esta tecnología aplicada junto con los sistemas de información geográfica brinda información de gran importancia a la hora de monitorear la evolución de distintos cultivos. Mediante modelos matemáticos

sencillos se pueden estimar rendimientos con un alto nivel de correlación, incluso dos meses antes de la cosecha de maíz o soja.

## 2.9. HIPÓTESIS

- Es posible identificar zonas con compactación subsuperficial del suelo diferencial a través de datos de rendimiento obtenidos a campo.
- El NDVI estimado a partir de imágenes satelitales permite identificar de manera remota las mismas zonas.
- El laboreo vía paraplow tiene efecto residual en rendimiento y compactación.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

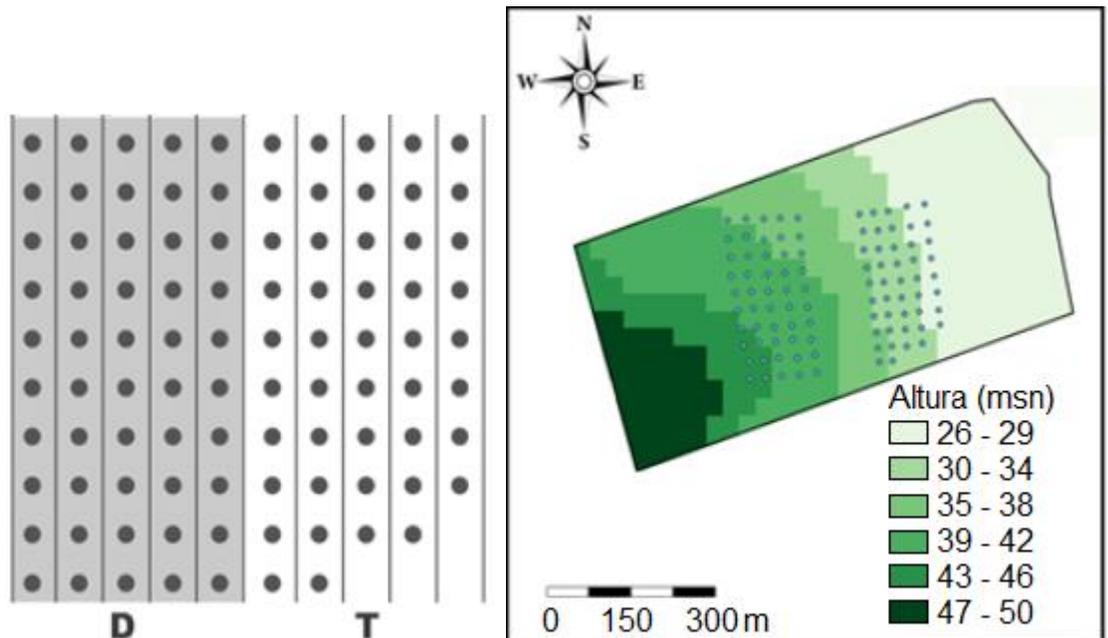
El trabajo se realizó en el establecimiento Chapacale, ubicado en el Departamento de Soriano, zona Oeste de la República Oriental del Uruguay (entre 33.175104 y 33.179562 de latitud Sur y 57.926233 y 57.912406 de longitud Oeste), y la parcela donde se situó el experimento se encontraba en el extremo oeste del mismo. En este sitio se realizó una labor de descompactación subsuperficial del suelo con paraplow ("D" de aquí en más en la tesis) en marzo de 2014, dejando una zona sin descompactar como Testigo (T). Desde esa fecha, el mismo permaneció en agricultura continua sin laboreo.

El tipo de suelo corresponde al grupo CONEAT 11.2 con relieve ondulado, predominando suelos Brunosol Éutrico Típico, pudiendo encontrarse en las zonas altas Brunosol Subeutrico Típico y lúvico (MGAP. DIRENARE. DSA, 2006).

#### 3.2. ESTRATEGIA DE TRABAJO

Se seleccionó un área de aproximadamente 6,4 ha, compuesta por 3,5 ha que habían recibido el manejo D y 2,9 ha con el manejo T. Sobre esta zona se definió una grilla de muestreo de 370 por 250 m, ubicando 50 puntos de muestreo en la zona D y 46 puntos de muestreo la zona T (Figura No. 3).

Cuatro puntos de muestreo de la zona D fueron descartados al quedar en sitios no representativos, puesto que era una zona de drenaje o desagüe.



En el esquema se indica el área que recibió el manejo D en el 2014 y el área con manejo T. Cada círculo representa un punto de muestreo. La distancia entre puntos fue de aproximadamente 30 m y entre las zonas D y T se estableció un corredor de 110 metros de ancho aproximadamente.

Figuras No. 3 y No. 4. Ubicación espacial de la grilla de muestreo indicando la zona descompactada (D) y el testigo (T) (a) sobre el mapa de elevación del terreno (b)

Con respecto a la altitud, puede observarse una tendencia a aumentar hacia el Suroeste. Esto puede influir en el rendimiento del cultivo y se analizará más adelante.

### 3.3. MANEJO DEL SITIO Y EL CULTIVO DE MAÍZ

La chacra estuvo largo tiempo bajo siembra directa, prácticamente sin rotación con pasturas. El cultivo anterior al del maíz fue soja. El manejo D fue realizado en el año 2014. El trabajo de campo se realizó durante la zafra 2016, evaluando la respuesta residual a este manejo en el cultivo de maíz. La siembra se realizó el 18 de diciembre de 2015 con la variedad Dow 505 a 56.000 plantas por hectárea. La cosecha fue el 10 de junio del 2016.

### 3.4. DETERMINACIONES

#### 3.4.1. A nivel del suelo (20/05/2016)

Resistencia a la penetración (RP) en suelo próximo a capacidad de campo. Se cuantificó hasta los 40 cm de profundidad utilizando un penetrógrafo digital Rimik CP20. Los valores fueron registrados cada 2 cm de profundidad y posteriormente se agruparon en intervalos de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30 cm y 30 a 40 cm y como promedio de 0 a 40 cm. Por sitio de muestreo se tomaron dos medidas tomando como “real” el promedio entre las dos mediciones.

#### 3.4.2. A nivel de cultivo

El día 20 de mayo de 2016, se determinó en cada punto de muestreo de la grilla la cantidad de plantas cada 15 m lineales. Posteriormente, conociendo la densidad de siembra, se calculó la población lograda.

El rendimiento en grano de maíz se estimó manualmente de la siguiente manera: en cada punto de muestreo se midió el largo de 15 espigas consecutivas. Se colectaron 10 espigas abarcando la variabilidad cuantificada en largo. Se desgranó y realizó el rendimiento en grano por espigas de manera independiente. Se estimó la ecuación de regresión entre rendimiento por espiga y largo de espiga, que resultó en

$$Y = 9,1351x + 10,757; R^2 = 0,96.$$

Donde X corresponde al largo de espiga (cm) e Y al peso de grano producido por la misma (g).

A partir de esta ecuación, se estimó el rendimiento en grano de maíz (base 14% de humedad) de cada sitio de muestreo.

#### 3.4.3. Cálculo de NDVI

Se realizó un análisis de la información obtenida del satélite Landsat 8, procesando las imágenes a través del programa Qgis. Se estimó el índice verde normalizado (NDVI) para cada punto de muestreo para 2 fechas durante el ciclo del cultivo, (20/1/2016 y 30/3/2016). Posteriormente se realizaron mapas de NDVI utilizando el programa ArcGis.

### 3.5. ANÁLISIS DE DATOS

Se realizó una Prueba t para la comparación de dos medias proveniente de muestras independientes tomadas desde dos grupos definidos como T y D. Las variables analizadas fueron RP, población, largo de espiga (cm), rendimiento por espiga (kg) y rendimiento en grano estimado ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Para la RP además, se graficaron los resultados para observar tendencias a distintas profundidades y se analizó el desvío estándar de la variabilidad de la resistencia por estrato de profundidad para D y T. Además se confeccionaron histogramas de frecuencia de valores de RP.

#### 3.5.1. Análisis espacial de la compactación

Utilizando los datos georreferenciados se confeccionó el mapa de valor medio de la resistencia a la penetración del suelo para el estrato 0-40 cm. Para ello se ajustaron semivariogramas siguiendo modelos exponenciales, gaussianos y esférico. Se seleccionó como mejor modelo el que presentó la menor relación umbral/pepita. Para ello se utilizó el programa ArcGis10.

El mapa interpolado de valores de resistencia a la penetración permitió identificar dos zonas de compactación promedio diferente, definida como “alta compactación (A) y baja compactación (B). Estas clases, se contrastaron en función del largo de espiga y la población obtenida. Se utilizó como límite 2.000 kPa de RP, ya que es mencionado en la bibliografía como umbral limitante para el correcto desarrollo radicular.

Seguido, se procedió a combinar el largo de espiga con los manejos D y T, generando así cuatro ambientes, los cuales fueron analizados mediante una prueba t para la comparación de medias proveniente de muestras independientes desde la combinación AD, AT, BD y BT.

De esta forma se elaboró el mapa estimado de rendimiento (de forma similar al mapa de compactación, mediante ArcGis10) y se comparó con un mapa topográfico elaborado en base a Google Earth. Se analizó el largo de espiga en función de la altimetría.

Por último, también con el uso de ArcGis10, se elaboró un mapa de NDVI para dos fechas (20/1/16 y 30/3/16), se buscó observar algún patrón que permitiera estimar el rendimiento.

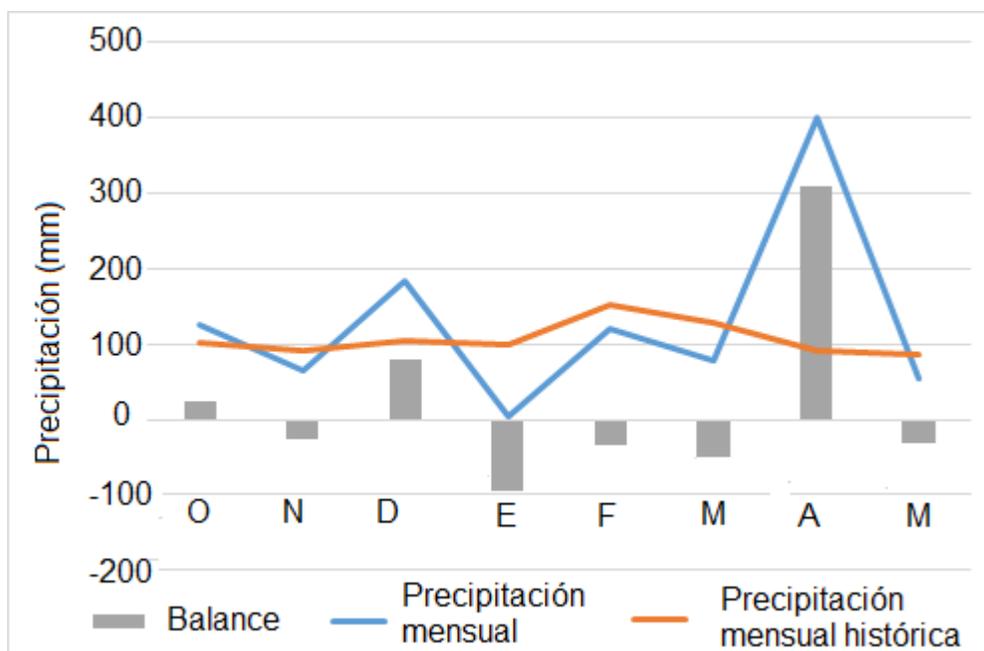
## 4. RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AÑO

#### 4.1.1. Precipitaciones

En base a los datos registrados en INUMET para el período 1961-1990 se procedió a compararlos con las precipitaciones promedio para el período octubre 2015 a mayo 2016 (Figura No. 5).

Durante el total del periodo hubo un mayor régimen pluviométrico que el promedio histórico, pero explicado principalmente por el exceso de precipitaciones durante abril. Si bien en dicho mes llovió 3 veces más que el promedio histórico, durante enero y parte de febrero las precipitaciones fueron inferiores al promedio.



Se representa las precipitaciones mensuales durante el ciclo del maíz (línea azul) y se realiza un balance respecto a la media histórica (barras grises). La curva naranja representa la precipitación mensual histórica.

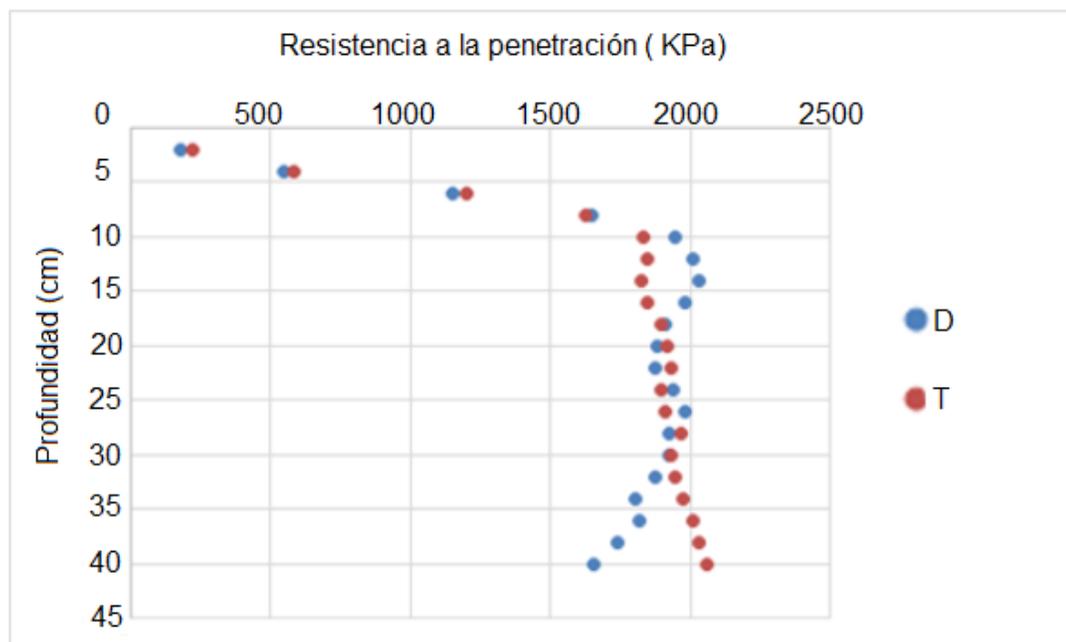
Figura No. 5. Precipitaciones durante octubre 2015 – mayo 2016 en relación al período 1961-1990

Fuente: elaborado en base a INUMET (2016).

El maíz fue sembrado el 18 de diciembre del 2015, por lo que los primeros estadios ocurrieron bajo oferta favorable de agua (diciembre llovió un 76% más del histórico) sin embargo durante buena parte del periodo de crecimiento en torno al período de definición del número de granos por espiga existieron deficiencias hídricas. Las precipitaciones durante el período enero a marzo fueron un 52% menos de lo normal. Según Otegui et al. (1995) el maíz es muy sensible a la falta de agua en torno a la floración ya que en esta etapa se fijan el número de granos por superficie, dicho estado ocurrió durante el mes de Febrero, por lo que posiblemente bajo fuertes déficits hídricos.

#### 4.2. RESISTENCIA DE LA PENETRACIÓN

El perfil de resistencia a la penetración del suelo fue similar en las dos zonas evaluadas (Figura No. 6).



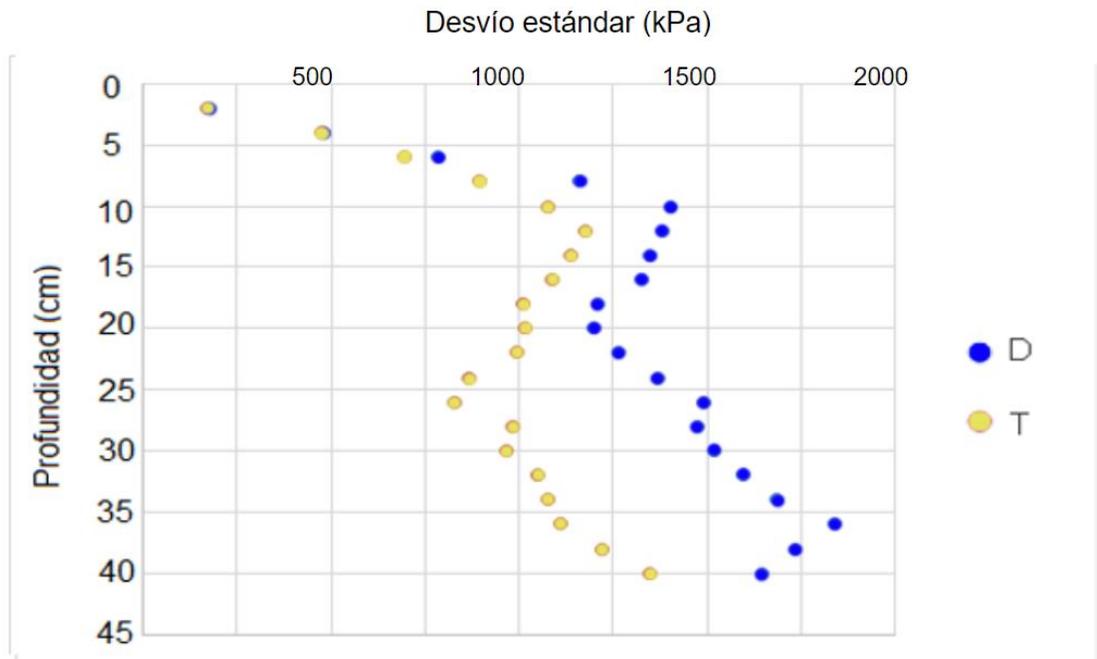
Se representa el grado de resistencia a la penetración en kilopascales, en rojo se representa la curva de T, mientras que el azul corresponde al manejo D.

Figura No. 6. Resistencia a la penetración según profundidad y manejo

Ambas zonas tuvieron un bajo nivel de compactación en los primeros 5 cm del perfil de suelo. Existieron diferencias en el estrato entre 10 a 20 cm de profundidad en la cual T se encontró menos compactado, mientras que en el estrato de 30 a 40 cm la zona D tuvo menor grado de compactación.

Cabe resaltar que el suelo se encontraba relativamente compactado, a partir de los 8 cm de profundidad el suelo, con valores de resistencia a la penetración de más de 1500 kPa. Este umbral es citado por Threadgill (1982) como un valor por encima del cual se dificulta el desarrollo radicular. Se deduce entonces que se partió de un suelo compactado y que luego de 2 años no se logró cuantificar un efecto residual del manejo D suficiente para revertir el problema cuantificado en la zona T.

No obstante, analizando la variabilidad de las determinaciones realizadas en cada zona se logró identificar mayor dispersión en D que en T (Figura No. 7).



Se representa en rojo la magnitud del desvío estándar del T según la profundidad de suelo, en azul se representa el desvío en la zona D.

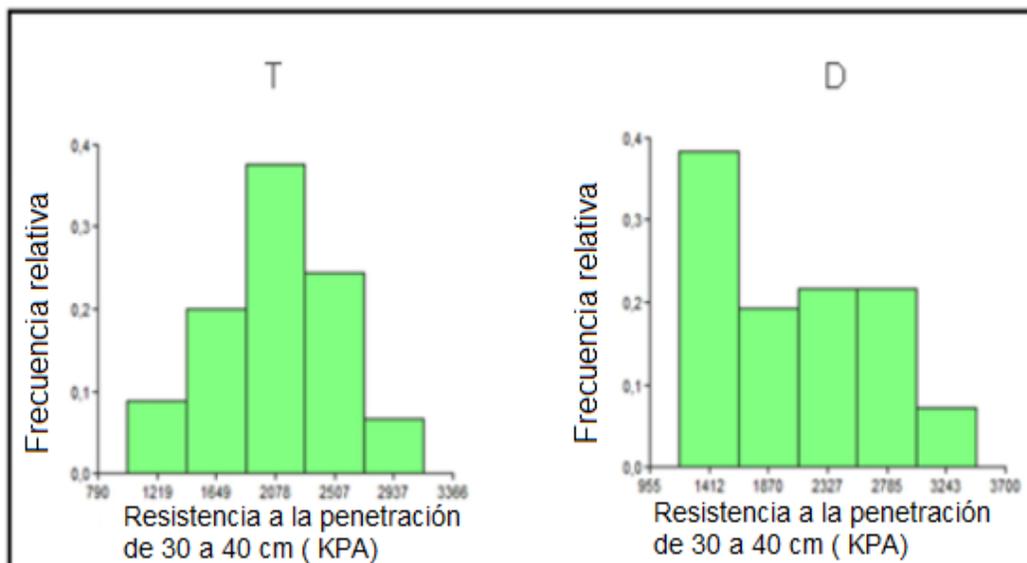
Figura No. 7. Desvío estándar de la resistencia a la penetración según manejo y profundidad de suelo

A medida que se profundizó en el perfil de suelo, la variabilidad de los datos fue aumentando. Esto es lógico, ya que la resistencia a la penetración aumentó en profundidad. Los desvíos de resistencia a la penetración fueron un 34% mayor en D que en T, siendo la mayor diferencia entre 26 a 36 cm de profundidad. En dicho estrato el desvío del manejo D fue más del 50% respecto al T.

Se interpretó este resultado como un efecto residual de D sobre la resistencia a la penetración del suelo que si bien no modificó el valor promedio de compactación en el suelo, modificó la distribución de la compactación, dejando lugares con baja compactación (Figura No. 8). Mientras que los valores más frecuentes en T estuvieron en 2100 kPa, en D hubo un 40% de puntos con valores de 1400 kPa. No obstante más del 50% de las lecturas promediaron valores superiores a 2000 kPa. Visto este efecto cabe resaltar que hay que ser muy cuidadoso en el uso de esta herramienta, ya que su efecto puede modificar las magnitudes de los procesos que ocurren en el suelo como conductividad hidráulica, mineralización, etc. Cabe la posibilidad de que parte de estos efectos sean irreversibles.

Para cuantificar si existieron modificaciones en parámetros adicionales, se procedió a seleccionar el último estrato de profundidad (en el que se encontró la mayor diferencia en el desvío estándar de las muestras), y comparar el comportamiento del modelo.

En T, la distribución de valores de RP cuantificados entre 30 y 40 cm se asemeja a una distribución normal ya que los valores centrales fueron los que más se repitieron. Sin embargo, la distribución en la zona D no es una curva normal, mostrando un claro impacto de la herramienta sobre la proporción de valores bajos aun en el mediano plazo. Algo curioso es que el valor promedio tanto de la zona D como del T fue muy similar (2093 y 2066) no existiendo diferencias significativas entre manejos. Sin embargo, al realizar el mismo análisis para otras profundidades, se encontraron resultados similares.



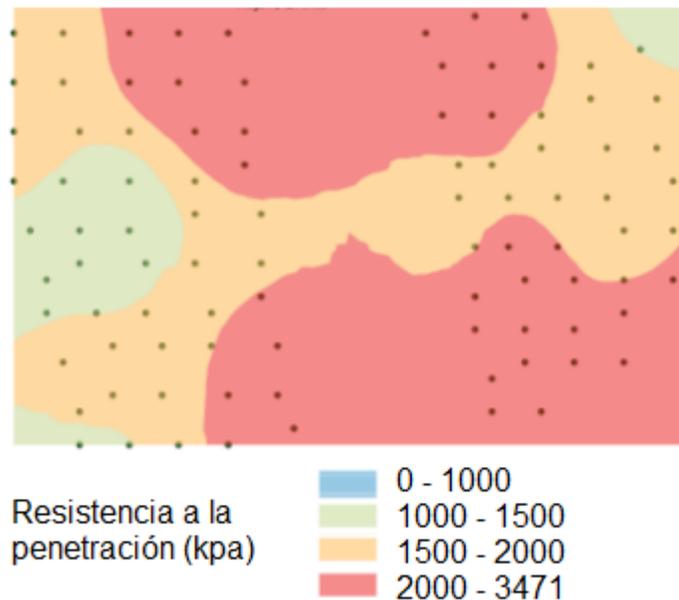
A la izquierda se representa el histograma de frecuencia de la resistencia a la penetración en KPa del T, en el estrato de 30 a 40 cm de profundidad de suelo. A la derecha se representa el mismo histograma pero para D.

Figura No. 8. Histograma de frecuencia de la compactación de 30 a 40 cm de profundidad

#### 4.2.1 Análisis espacial de la resistencia a la penetración

En la Figura No. 9 se presenta un mapa de distribución espacial de la resistencia a la penetración del suelo en el perfil de suelo estudiado.

Resistencia a la penetración los primeros 40 cm del suelo



Se representa mediante colores el nivel de la resistencia a la compactación promedio a lo largo de perfil de suelo. Cada círculo representa un punto de muestreo, correspondiendo los de la mitad derecha al manejo T.

Figura No. 9. Representación espacial de la compactación

Si bien fue posible identificar zonas con compactación diferencial las mismas no coincidieron con las zonas T y D (promedio a lo largo de los primeros 40 cm) (5 primeras filas de la grilla a la izquierda corresponden a D, a la derecha T).

#### 4.3. RESULTADOS A NIVEL DE CULTIVO

Los datos de rendimiento de maíz tuvieron distribución normal dentro de las zonas D y T respectivamente ( $p=0,6$  para datos provenientes de D y  $p=0,18$  para datos provenientes de T, Figura No. 10).

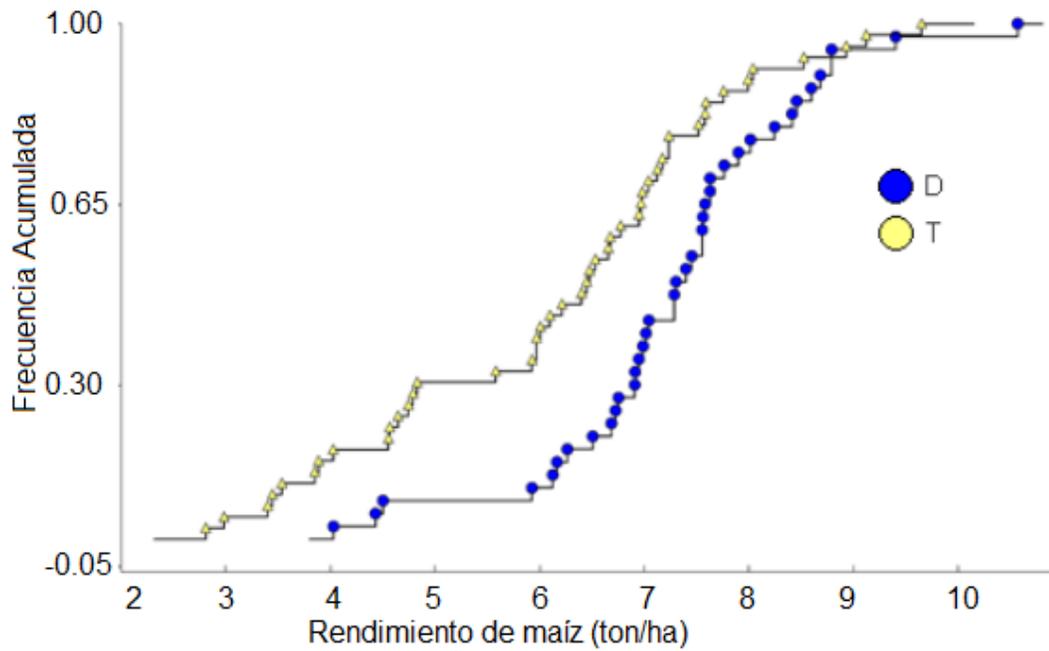


Figura No. 10. Frecuencias acumuladas en función del rendimiento (kg/ha)

El rendimiento promedio fue de 7295 contra 6155 kg ha<sup>-1</sup> para D y T respectivamente, estableciéndose una diferencia entre medias significativamente diferentes, lo que permite afirmar que no provienen de la misma población de datos (Cuadro No. 1).

Cuadro No. 1. Análisis estadístico de largo de espiga (cm), rendimiento por espiga, población y rendimiento según manejo

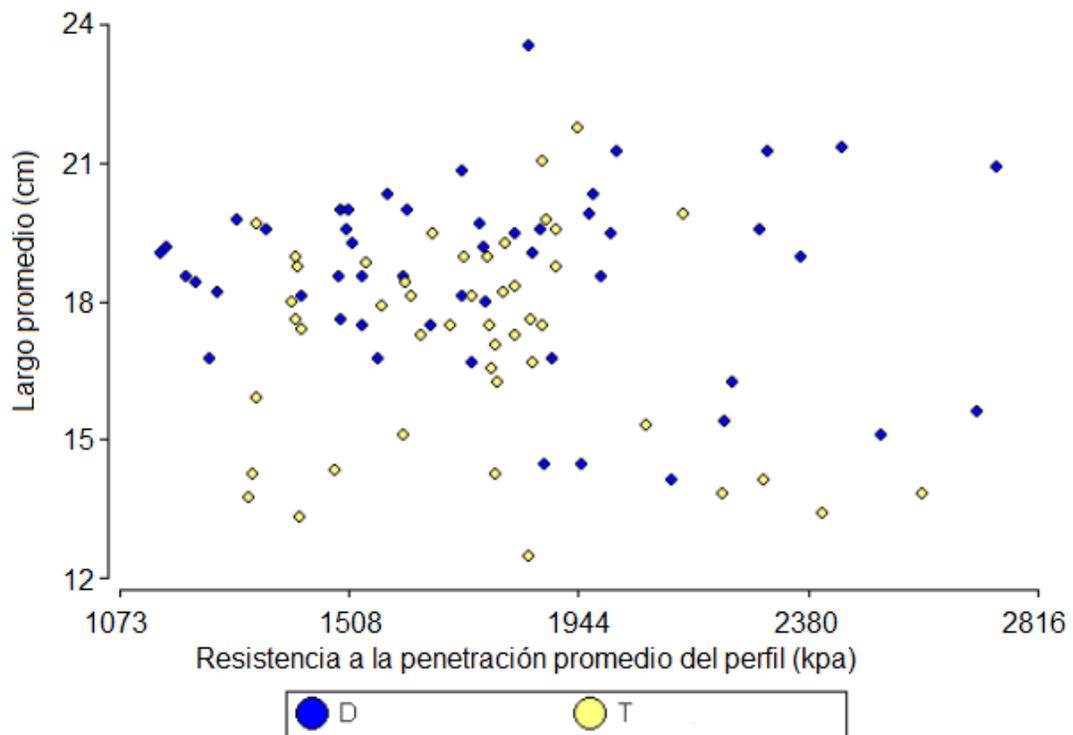
Variable	G.1	G.2	n1	n2	Med. 1	Med. 2	T	p valor
Largo de espiga promedio (cm)	D	T	50	46	18,35	17,02	3,25	0.0016*
Rendimiento / espiga (g)	D	T	50	46	150	130	3,48	0.0008
Población (mil plantas/ha)	D	T	50	46	52	49	1,86	0,18
Rendimiento kg/ha	D	T	50	46	72 95	61 55	3, 5	0.00 08

D Manejo T Testigo

\* Diferencia estadística significativa

Estas diferencias en rendimiento resultaron de una tendencia a mayor población lograda en la zona D (52000 contra 49000 plantas ha<sup>-1</sup> para D y T respectivamente) y mayor rendimiento por espiga producto de espigas más largas.

Los resultados de implantación y población lograda, si bien siguieron la tendencia cuantificada por Martino (1998), no fueron de una magnitud equivalente (población 56% superior con paraplow), lo que explica la baja respuesta a la D en rendimiento



Los puntos amarillos corresponden a los datos del T, mientras que los azules corresponden a D.

Figura No. 11. Largo de espiga promedio en función de la resistencia a la penetración con D y testigo

Se puede observar en la figura anterior que aparentemente no existió una relación entre la compactación y el largo de la espiga. Sin embargo, si se observa con atención se encuentra que a altos valores de compactación (mayor a 2000 kPa) no se logró un buen largo de espiga en el T, mientras sí se logró un buen largo de espiga en el manejo D. Además se observa que en valores bajos de compactación, la variabilidad en el largo de la espiga en el manejo D es baja y a medida que aumenta la compactación aumenta la variabilidad en el rendimiento, existiendo tanto valores muy altos como muy bajos.

Como se puede observar en el Cuadro No. 1, existieron diferencias significativas en el largo de espiga a favor de D, siendo un 7,8 % superior, mientras que la población si bien no hubo diferencia estadística significativa, si se observa una tendencia a favor de D ( $p < 0,07$ ).

Se realizó un análisis estadístico sobre la variable población en plantas por hectárea, con la intención de evaluar la implantación en D vs testigo. Si bien

el promedio fue superior en D (52000 vs. 49000) no existieron diferencias estadísticas. Siendo este un resultado contrastante con los resultados observados en Uruguay por Martino (1998), donde la implantación donde se aplicó el paraplow fue un 56% superior a donde no se aplicó.

Con el objetivo de entender un poco más el comportamiento de los datos y qué variables influyen sobre el rendimiento, se decidió comparar el rendimiento en las zonas de alta y baja compactación. Se estableció como límite arbitrario 2.000 kPa de RP, citado por Threadgill (1982) como valor crítico, y luego se realizó el análisis estadístico correspondiente.

Cuadro No. 2. Rendimiento estimado (kg ha<sup>-1</sup>) según grado de compactación

<b>Clasific.</b>	<b>Variable</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>n1</b>	<b>n2</b>	<b>Med. 1</b>	<b>Med. 2</b>	<b>p-valor</b>
<b>Comp.</b>	<b>Rend. (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	Alta	Baja	20	76	6191	6889	0,2

Como se puede observar, no existieron diferencias significativas entre zonas de alta y baja compactación. Es por esto que se procedió a particionar los datos según el manejo (D y T), comparando de esta forma todas las combinaciones de baja o alta compactación, con o sin D. Se realizó la misma prueba T para dos medias y se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro No. 3. Comparación de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) todos contra todos, teniendo en cuenta el manejo y nivel de compactación (alta o baja)

<b>Caso</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>n (1)</b>	<b>n (2)</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>	<b>p-valor</b>
<b>I</b>	<b>(A: D)</b>	<b>(A: T)</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>7039</b>	<b>4213</b>	<b>0,0073*</b>
II	(A: D)	(B: D)	14	36	7039	7382	0,5519
III	(A: D)	(B: T)	14	40	7039	6446	0,2469
<b>IV</b>	<b>(A: T)</b>	<b>(B: D)</b>	<b>6</b>	<b>36</b>	<b>4213</b>	<b>7382</b>	<b>0,0001*</b>
<b>V</b>	<b>(A: T)</b>	<b>(B: T)</b>	<b>6</b>	<b>40</b>	<b>4213</b>	<b>6446</b>	<b>0,0018*</b>
<b>VI</b>	<b>(B: D)</b>	<b>(B: T)</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>7382</b>	<b>6446</b>	<b>0,0043*</b>

**A** Alta compactación, **B** Baja compactación

**T** Testigo, **D** Paraplow

\* Diferencias estadísticas

Se realizaron 6 comparaciones posibles, **n** indica el número de muestras para cada caso, el p-valor menor a 0,05 indica si hay diferencia significativa entre las dos clases comparadas.

Se pudo observar cuatro situaciones en las que se aprecian diferencias significativas: **I, IV, V y VI**.

Como era de esperar la comparación IV dio altamente significativa, se trata de la zona de baja compactación con D contra alta compactación sin D.

En la comparación V, quedó en evidencia que la compactación fue un factor restrictivo para el rendimiento, ya que la zona de alta compactación rindió significativamente menos que el lugar de baja compactación, sin la intervención del paraplow.

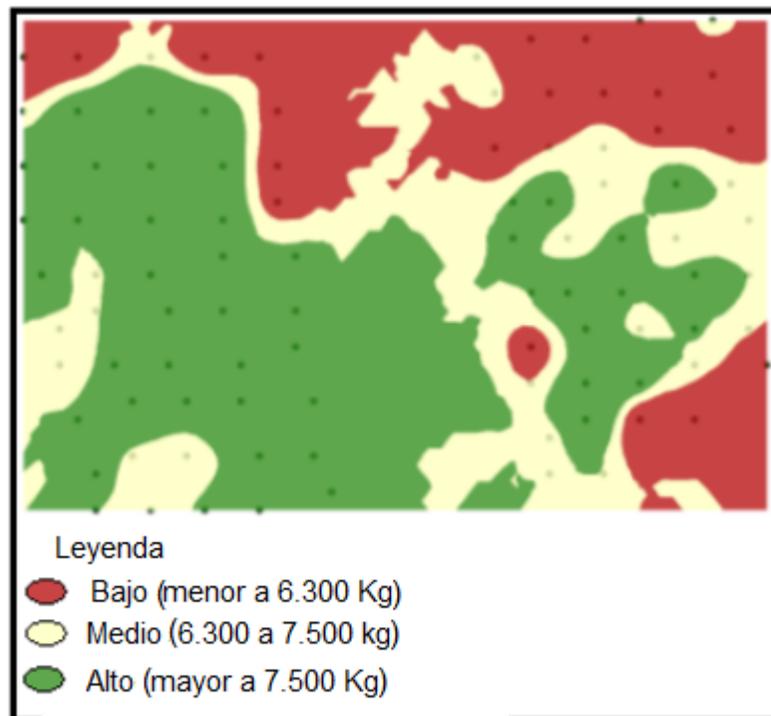
En la VI zonas de baja compactación existieron diferencias según el manejo, probablemente debido a que según Threadgill (1982) si bien 2000 kPa aparece como muy restrictivo, a partir de 1500 kPa ya existen leves restricciones.

Cuando se analizó la comparación I, ambos escenarios de elevada compactación, quedó en evidencia que si bien D no logro descompactar para obtener valores bajos de compactación, sí tuvo un gran impacto en rendimiento siendo un 67% superior.

El rendimiento puede ser influenciado por el largo de espiga (cm) y por la población.

Otra conclusión interesante es lo que sucede en el caso III, no existieron diferencias entre A/D vs. B/T, mientras que A/T fue muy inferior a B/T, por lo que se puede decir que D fue efectivo para mejorar el rendimiento cuando la compactación es alta.

A continuación, en la Figura No. 12 se muestra la distribución espacial de rangos de rendimiento en grano de maíz establecidos en terciles. El tercil entorno a la media estuvo entre 6300 y 7500 kg ha<sup>-1</sup>, siendo el tercil superior mayor a 7500 kg ha<sup>-1</sup> y el inferior, menor a 6300 kg ha<sup>-1</sup>.



Cada color representa un estrato de rendimiento, quedando representado en forma espacial zonas de alto, medio y bajo rendimiento, cada círculo corresponde a un punto de muestreo.

Figura No. 12. Mapa estimación de rendimiento

Mientras que en la zona D, el 70 % de los sitios de muestreo el rendimiento de maíz se ubicó en el tercil superior de rendimiento, en la T fueron solo el 30,4% de los registros, predominando los rendimientos del tercil inferior. Sin embargo, si se complementa esta información con la que brinda el mapa de

elevación, se puede observar que hacia el Este de la chacra, la altura disminuye. La altura media de la zona alta es de 41,7 m, la de la zona baja es de 37,8 m. Por tanto, puede existir un efecto confundido con el del ambiente que puede explicar las diferencias registradas en el rendimiento, y que esté confundiendo el efecto de la descompactación aplicada en la zona D.

De forma de analizar el posible impacto de la topografía sobre los resultados de maíz se estudió la interacción que presentó el largo de espiga con la altura sobre el nivel del mar (Figura No. 12).

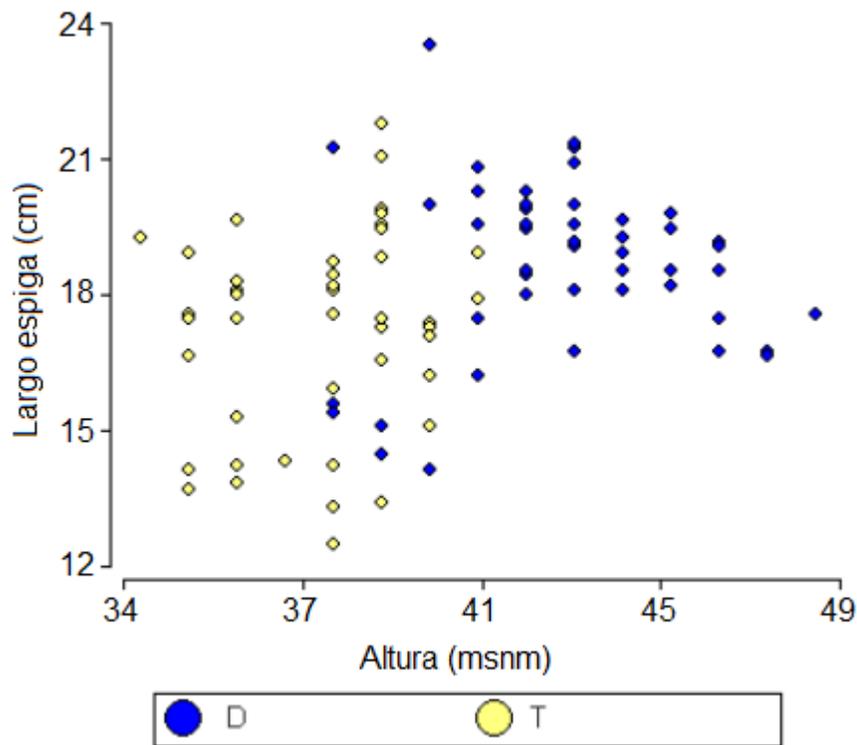


Figura No.13. Largo de espiga en función de la altura del terreno

Si bien a simple vista se observa cierto efecto de la topografía en el rendimiento del maíz, igualmente se procedió a realizar una prueba T para dos medias. La variable en cuestión es el largo de espiga y se particionó el resultado entre las zonas de distinto rendimiento tomadas de la Figura No. 11. Se trata de una prueba bilateral, donde n indica el número de muestras de cada estrato y el p-valor menor a 0,05 si existen diferencias estadísticas (Cuadro No. 4).

Cuadro No. 4. Comparación de largo de espiga según zona de rendimiento estimado

Contrastes			n1	n2	Medias		p-Valor
Medio	vs.	Bajo	17	31	18,12	16,55	0,0013
Medio	vs.	Alto	17	48	18,12	18,32	0,6037
Bajo	vs.	Alto	31	48	16,55	18,32	0,0006

La prueba t muestra que el rendimiento de la zona de rendimiento “bajo” es menor al de las demás, no existiendo diferencias entre “medio” y “alto” ( $p \leq 0,05$ ).

Teniendo en cuenta el detalle de que el estrato de bajo rendimiento es diferente y observando el mapa de las zonas de rendimiento y comparándolo con la Figura No. 4 (mapa de elevación de terreno), parece haber una asociación entre rendimientos bajos y las zonas de menor altura de elevación, siendo este efecto de mayor impacto que el manejo.

#### 4.4. ÍNDICE VERDE NORMALIZADO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

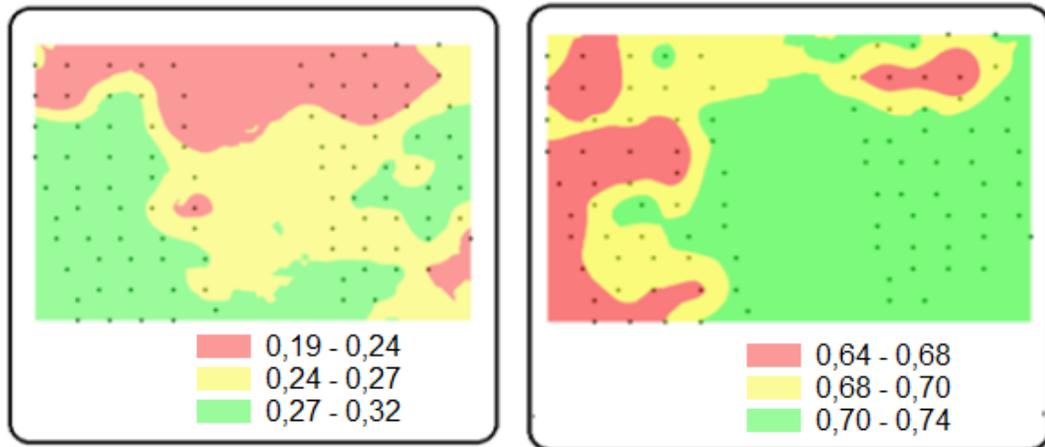
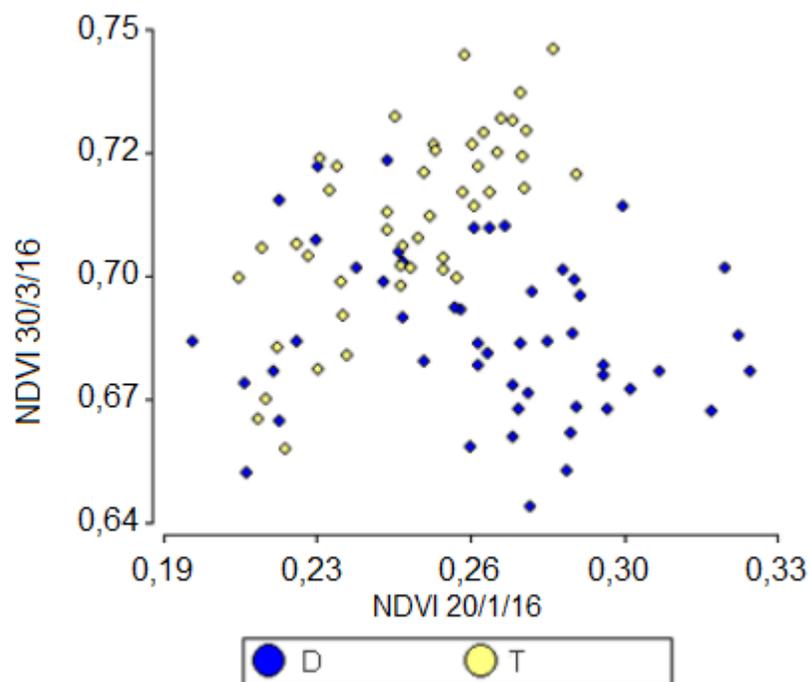


Figura No. 14. Mapas de NDVI para dos fechas: 20/1/16 y 30/3/16 respectivamente

En la Figura 14 se representan los valores del índice verde (NDVI) en tres clases, alto (verde) medio (amarillo) y bajo (rojo), junto con los puntos de muestreo. En la figura del 20-1 el maíz se encontraba aún en su etapa vegetativa en un estadio temprano en su ciclo. Se observó una clara tendencia a valores

más altos donde se utilizó la herramienta D en comparación al T, puede que esto indique que los efectos benéficos del D se dieron al comienzo del cultivo, quizás en la implantación. También se obtuvo información de una imagen satelital posterior, donde el cultivo se encontraba más avanzado en su ciclo fenológico. En la figura del 30-3 se observó que la tendencia es inversa a la que se obtuvo en enero. Se esperaría que el rendimiento sea entonces superior en el T ya que su NDVI fue superior al final del ciclo, sin embargo el largo de las espigas fue superior en el manejo D. Cabe destacar que se sembró una Avena al voleo mientras aún estaba el maíz y quizás ejerza cierto efecto enmascarador del NDVI no correspondiendo al valor del cultivo.

Se utilizó la información de las 2 imágenes anteriores y se realizó una gráfica donde se representan los valores de NDVI de cada punto y se diferencian los puntos con y sin D de forma de analizar la información en conjunto.



El eje **x** representa al valor de índice verde del 1/2016, el eje **y** representa el valor del índice verde del 3/2016. En amarillo se representa el T y en azul D.

Figura No. 15. Relación entre ambas fechas de NDVI

Se pueden sacar varias conclusiones. Primero que los valores de NDVI fueron mucho más altos en la imagen tomada en marzo respecto a la de enero, esto se debe a que en enero la cobertura del maíz aún era baja, por no tener suficiente área foliar no logró captar toda la luz que más adelante en su ciclo si

captaría. También se observa que los valores más altos de NDVI se obtuvieron en el T (0,75 vs. 0,72).

Sin embargo, lo más interesante que se puede concluir de la gráfica, es que la distribución de los valores fue diferente en cada caso, mientras que los valores de la zona donde se aplicó paraplow no siguieron ninguna secuencia lógica o patrón, ya que valores altos en enero podrían ser altos o bajos en marzo y viceversa, los valores del NDVI del T, tuvieron una relación lineal positiva bien clara. Se podrían realizar algunas hipótesis sobre el por qué se dio ese cambio, una podría ser que el manejo D levantó ciertas restricciones que impactan al comienzo del cultivo (podría ser facilidad de emergencia) pero que no inciden luego en el ciclo del cultivo, mientras que en el T, donde mejor empezó fue el mejor lugar, las mejores condiciones durante todo el ciclo, mostrando un NDVI superior en ambos momentos del cultivo.

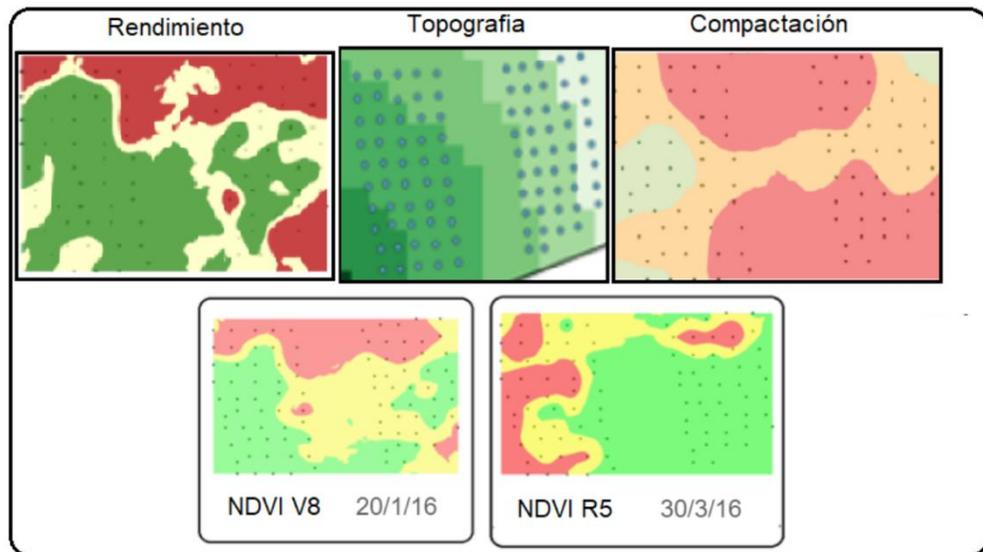


Figura No. 16. Síntesis de los distintos mapas elaborados

A modo de resumen se presentan los mapas elaborados. Hay que resaltar en primer lugar que el mapa de rendimientos no tuvo correlación con el mapa de resistencia a la penetración y al no haber correlación, cualquier estimador de rendimiento como NDVI no permitirá conocer zonas compactadas.

Sin embargo sí parece haber relación con el mapa de topografía, por lo que intuimos que fue más importante el efecto del lugar de la chacra para el rendimiento. Con respecto a las imágenes de NDVI comparadas con el mapa de rendimiento, a simple vista parece ser que el NDVI en V8 se corresponde

bastante con el mapa de rendimiento y no se corresponde con el mapa de RP, sin embargo el NDVI en R5 no tiene correlación alguna con ninguno de los mapas.

## 5. DISCUSIÓN

Se partió de un suelo con indicios claros de compactación, con valores medios de resistencia mecánica a la penetración de 1762 kPa. Esto, sumado al régimen hídrico que marcó una clara deficiencia de agua al menos durante el período crítico de determinación del rendimiento de maíz, haría esperar respuesta positiva a la descompactación.

El promedio de la compactación a lo largo de todo el perfil no dio diferencias entre D y T, sin embargo, los desvíos respecto a la media, fueron 35% mayores en D, quedando en evidencia, un efecto residual de largo plazo del uso de la herramienta. Además, queda clara la complejidad del estudio de la variable, donde claramente no se deben sacar conclusiones apresuradas.

Bajo la misma mirada del punto anterior, se observó como la labor vía paraplow, si bien no dejó efectos residuales en la media de resistencia a la penetración, si modificó la distribución de la compactación, mientras que en el T, se asemeja a una curva normal, cuando se observa el histograma de frecuencia en D, claramente no responde a una distribución normal.

Inesperadamente, cuando se dividió en zonas de baja y de alta compactación y luego se comparó el rendimiento entre ambas zonas, no existieron diferencias significativas. Cuando se profundizó en el análisis haciendo una comparación particionando por manejo, es decir zonas de alta y baja compactación y luego con y sin D, haciéndose todas las comparaciones entre las distintas combinaciones; allí se observó que las zonas de alta compactación con D rindieron más que las de alta compactación sin D, por lo que puede dar a entender que la redistribución de la compactación que generó el D, aun sin modificar la media puede que tenga efectos, en este caso positivos. Otra conclusión interesante es lo que sucede en el caso III, no existen diferencias entre A/D vs. B/T, mientras que A/T es muy inferior a B/T, por lo que se puede decir que D fue efectivo para mejorar el rendimiento cuando la compactación es alta, logrando que no existan diferencias con baja compactación.

Se observó, que en los sitios de compactación alta (arriba de 2000 kPa de resistencia a la penetración) no hubo altos rindes donde no se utilizó el D, mientras si hubo rindes aceptables donde se pasó la herramienta. Marcando un umbral donde la compactación se vuelve una seria limitante y se vuelve atractivo realizar alguna intervención para revertir dicha compactación. Cabe resaltar que dicho valor es coincidente con valores mencionados como limitantes en la bibliografía.

Sobre las imágenes satelitales, se encontró que el mapa de NDVI en V8, presentó cierta relación con el mapa de rendimiento, no siendo así en R5. Entre ambas imágenes satelitales no se encontró una relación clara, sin embargo si se puede deducir que donde no se pasó la herramienta si el cultivo comenzó bien, terminó bien, mientras que donde se pasó la herramienta no se dio esa relación. Puede que el D haya levantado alguna restricción inicial del cultivo, mientras que esa restricción sí se expresó en el T, posiblemente debido a heterogeneidad de suelos, esa misma restricción inicial se mantuvo su efecto negativo durante todo el ciclo del maíz, mientras que el D enmascaro la restricción al inicio del ciclo, pero luego esas zonas limitan el rendimiento.

También se determinó un umbral de compactación a partir del cual parece justificarse la aplicación de esta tecnología, coincidiendo dicho umbral con el valor mencionado por Threadgill (1982) a partir del cual se ve limitado el crecimiento de las raíces. Cabe mencionar que se deben tener en cuenta otros factores para determinar si vale la pena la aplicación de la tecnología, como la textura del suelo.

Por último no se pudo comprobar la hipótesis de que el rendimiento delimitara zonas de compactación. Puesto que el NDVI es un estimador de rendimiento, tampoco se pudo identificar dichas zonas mediante el uso de esta herramienta. En cuanto a la última hipótesis, se comprobó que existe efecto residual del laboreo vía paraplow, tanto en rendimiento como en compactación.

## 6. CONCLUSIONES

De este trabajo se puede concluir que en promedio las diferencias de rendimiento de maíz atribuibles al efecto residual del manejo D fueron de 1140 kg ha<sup>-1</sup> en zonas de bajo rendimiento. Por encima de 8000 kg ha<sup>-1</sup> estas diferencias desaparecieron.

Las zonas compactadas, delimitadas con medidas a campo no coincidieron con las zonas D y T. No existieron diferencias significativas entre los promedios de zonas descompactadas y testigo sin descompactar.

No fue posible diferenciar zonas de compactación mediante el uso de NDVI, sin embargo se observó relación entre el NDVI en V8 y el rendimiento.

## 7. RESUMEN

Dentro del complejo escenario respecto a calidad de los suelos en el cual se encuentra la agricultura hoy en día, se realizó un experimento con el objetivo de evaluar los efectos residuales del laboreo vía paraplow en el suelo y en el cultivo a mediano plazo. El experimento consistió en el laboreo vía paraplow (D), una herramienta similar a un cincel el cual descompacta en profundidad el suelo. Se llevó a cabo el experimento en una chacra comercial en la localidad de Mercedes, donde se aplicó el paraplow un año y medio antes de cuando se realizaron las mediciones tanto a nivel de suelo como del cultivo. Se midió: resistencia a la penetración a lo largo del perfil del suelo, número de plantas cada 15 metros lineales, largo de la espiga. También se utilizaron imágenes satelitales de NDVI con el fin de comprender mejor que paso a lo largo del cultivo. Si bien existió diferencia estadística del D en el largo de espiga y por lo tanto del rendimiento a favor de D (aprox.  $1140 \text{ kg ha}^{-1}$ ), no fue así cuando se probó estadísticamente la resistencia a la penetración, no habiendo diferencias entre manejos, siendo esta la variable que se esperaría pudiera explicar la diferencia de rendimiento. Si bien no existieron diferencias significativas entre las zonas en cuanto a la resistencia de la penetración, en el caso del T el desvío estándar y la variabilidad en los muestreos fue mucho menor, mientras que en D la variabilidad en los datos era enormes, habiendo puntos muy descompactados y muy compactados pero la media entre ambas zonas fue prácticamente igual. No se dio una alta correlación inversa como era esperable entre la resistencia a la penetración y el rendimiento, sin embargo si se identificó un umbral de resistencia a la penetración a partir del cual no habían rendimientos altos en el T mientras que si habían rendimientos altos pasado ese umbral en D. Quizás en parte no existió una correlación entre resistencia y rendimiento debido a que los rendimientos fueron bajos respecto al potencial del maíz y quizás existieron otras limitantes que en parte enmascaran el efecto de esta variable. Es importante resaltar que se realizó un histograma de frecuencia de la compactación en distintos estratos de profundidad, sorprende que en el caso del T, como resultante da una curva normal tipo campana, mientras que en D no existe un patrón lógico para la distribución de la compactación, no asemejándose a una curva normal, quedando en evidencia, la clara influencia del laboreo y abriendo muchas interrogantes en cuanto a su respuesta en el suelo. Es importante resaltar que el ambiente en el cual se llevó a cabo el experimento, si bien era similar entre manejos existían algunas diferencias topográficas leves, lo cual deja dudas sobre la igualdad de ambientes y puede que algunas diferencias no se deban al manejo per se, sino a una diferencia propia de los ambientes que le tocó al manejo D y a T.

Palabras clave: Paraplow; Compactación; NDVI.

## 8. SUMMARY

Within the complex scenario regarding the quality of the soils in which agriculture is nowadays, an experiment was carried out with the objective of evaluating the effects in the soil and in the crop in the medium term. The experiment consisted of tillage via D, a tool similar to a chisel, which decomposes the soil in depth. The experiment was carried out in a commercial farm in the town of Mercedes, where the treatment was applied a year and a half before the measurements were made at both soil and crop levels. It was measured: resistance to penetration along the soil profile, number of plants every 15 linear meters, length of the spike. NDVI satellite images were also used in order to better understand what happened along the crop. Although there was a statistical difference of the treatment in the length of the spike and therefore the yield in favor of the treatment (approx. 700 kg / ha), this was not the case when the resistance to penetration was statistically proved, there being no differences between the treatments. This being the variable that we expected could explain the difference in performance. Although there were no significant differences between the treatments in terms of penetration resistance, in the case of the control the standard deviation and the variability in the samples was much lower, while in the treatment the variability in the data was enormous, having points very uncompacted and very compacted but the average between both treatments was practically the same. There was not a high inverse correlation as expected between the resistance to penetration and yield, however if a penetration resistance threshold was identified from which there were no high yields in the control while there were high yields past That threshold in the treatment. Perhaps in part there was no correlation between resistance and yield because the yields were low with respect to the corn potential and perhaps there were other limitations that partly mask the effect of this variable. It is important to note that a frequency histogram of the compaction was made in different layers of depth, surprising that in the case of the control, as a result it gives a normal curve bell type, while in the treatment there is no logical pattern for the distribution of the compaction, not resembling a normal curve, being evident, the clear influence of the tillage and opening many questions regarding its response on the ground. It is important to highlight that the environment in which the experiment was carried out, although it was similar between treatments, there were some slight topographical differences, which leaves doubts about the equality of environments and some differences may not be due to the treatment per se, but to a difference of the environments that touched the treatment and the witness.

Keywords: Paraplow; Compaction; NDVI.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, C.; Torres Duggan, M.; Chamorro, E.; Taboada, M. 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. 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. San José, Costa Rica, s.e. p. irr.
3. 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.
4. Baumhardt, R.; Jones, O.; Schwartz, R. 2008. Long-term effects of profile-modifying deep plowing on soil properties and crop yield. *Soil Science Society of America Journal*. 72:677-682.
5. Bechtle, W. 1985. Erfahrungen und Ergebnisse aus Tieflockierungen in BadenWürttemberg. *Schriftenreihe des Deutschen Verbands für Wasserwirtschaft und Kulturbau*. 70:37-74.
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. Borchert, H.; Graf, R. 1988. Zum Vergleich von Penetrometermessungen, durchgeführt bei unterschiedlichem Wassergehalt. *Z Pflanzen Bodenk.* 151:69-71.
9. 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 (*Glycine max* L.) yields. *Soil and Tillage Research*. 78(1):53-58.

10. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Ressia, M.; Ferrero, C.; Rosatto, H.; Tourn, M. 2006a. Deep tillage and traffics on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus* L.). Soil and Tillage Research. 91(1):164-172
11. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Rosatto, H.; Ferrero, C. 2006b. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the rolling Pampa region of Argentina. Soil and Tillage Research. 86(1):9-14.
12. \_\_\_\_\_.; Tolón, A.; Lastra, X.; Tourn, M. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean Pampas. Soil and Tillage Research. 110(1): 167-174.
13. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Balbuena, R.; Rivero, D. 2013. Continuous application of direct sowing: traffic effect on subsoil compaction and maize (*Zea mays* L.) yields in argentinean pampas. Soil and Tillage Research. 134:111-120.
14. Braford, J. M.; Gupta, S. 1986. Soil compressibility. In: Klute, A. ed. Methods of soil analysis. Madison, WI, ASAE. pp. 479-492.
15. Busscher, W.; Sojka R.; Doty, C. 1986. Residual effects of tillage on coastal plain soil strength. Soil Science. 141(2):144-148.
16. Cannell, R. Q.; Jackson, M. B. 1981. Alleviating aeration stresses. In: Arkin, G. F.; Taylor, H. M. eds. Modifying the Root Enviroment to Reduce Crop Stress. St. Joseph, MI, ASAE. pp. 141-192 (ASAE Monograph no. 4).
17. Carter, M. 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of loosening tillage studies. Canadian Journal of Soil Science. 68:657-668.
18. \_\_\_\_\_.; Gregorich, E.; Anderson, D.; Doran, J.; Janzen, H.; Pierce, F. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Developments in Soil Science. 25:1-19.
19. Cittadini, M.; Del Boca, A.; Fuentes, L.; Nardi, F. 2016. Relación entre índices de vegetación y rendimiento en maíz. Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 14 p.

20. Collis-George, N.; Yoganathan, P. 1985. The effect of soil strength on germination and emergence of wheat. *Australian Journal of Soil Research*. 23:589-601.
21. Daddow, R. L; Warrington, G. E. 1983. Growth-limiting soil densities as influenced by soil texture. (en línea). Fort Collins, CO, USDA. Forest Service. Watershed Systems Development Group. 17 p. Consultado 16 feb. 2018. Disponible en [https://forest.moscowfs.wsu.edu/smp/solo/documents/RPs/daddow\\_warrington\\_root\\_limiting\\_bulk\\_density.pdf](https://forest.moscowfs.wsu.edu/smp/solo/documents/RPs/daddow_warrington_root_limiting_bulk_density.pdf)
22. Dawidowski, J. B.; Koolen, A. J.; Lerink, P. 1987. Controlled distortion of soil samples with reference to soil physical effects. *Soil and Tillage Research*. 17:15-30.
23. 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/soilcompaction/index.html>
24. De San Celedonio, R. P.; Micheloud, J. R.; Abeledo, L. G.; Miralles, D. J.; Slafer, G. A. 2014. Riesgo de anegamiento en trigo (*Triticum aestivum* L.) para distintas localidades de la región triguera argentina. *Ciencia del Suelo*. 32:233-246.
25. Dexter, R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*. 11(3):199-238.
26. \_\_\_\_\_. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*. 20(1):87-100.
27. 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.
28. Ernst, O.; Bentancur, O. 2004. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de N-NO<sub>3</sub>-en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia (Uruguay)*. 8(1):29-40.
29. \_\_\_\_\_.; 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.

30. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2002. Agricultura de conservación: estudios de casos de América Latina y África. Rome. 26 p. (Boletín no. 78).
31. García Préchac, F.; Rovira, L. A.; Uriarte, G. 1979. Efecto de diferentes pasturas y su duración sobre algunas propiedades físicas del suelo con 1, 2 y 3 cultivos de trigo posteriores. *In*: Reunión Técnica de la Facultad de Agronomía (2<sup>a</sup>., 1979, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 55-56.
32. \_\_\_\_\_. 1992. Propiedades físicas y erosión en rotaciones de cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. 9 p. (Serie Técnica no. 11).
33. \_\_\_\_\_.; Ernst, O.; Siri-Prieto, G.; Terra, J. A. 2004. Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*. 77(1):1-13.
34. Glinski, J.; Lipiec, J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton, FL, CRC. 250 p.
35. Grass, K. 1971. Der Einfluß der Tiefenbearbeitung und Tiefendüngung auf pseudovergleyte Braunerden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*. 12:179-181.
36. Hadas, A.; Stibbie, E. 1997. Soil crusting and emergence of wheat seedings. *Agronomy Journal*. 69:547-550.
37. Harrison, D. 1993. The effect of subsoiling on plant nutrition and pasture production. PhD. Thesis. Lincoln, New Zealand. Lincoln University. 232 p
38. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2015. Estadística climatológica 1980-2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 18 nov. 2016. Disponible en <http://www.inia.uy>
39. 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.

40. \_\_\_\_\_.; 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.
41. Jorajuría, D.; Draghi, L.; Aragón, A. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland. *Soil and Tillage Research*. 41:1-12.
42. 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
43. Karlen, D.; Wollenhaupt, N.; Erbach, D.; Berry, E.; Swan, J.; Eash, N.; Jordahl, J. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*. 31(2-3):149-167.
44. Kautz, T.; Amelung, W.; Ewert, F.; Gaiser, T.; Horn, R.; Jahn, R.; Javaux, M.; Kemna, A.; Kuzyakov, Y.; Munch, J.C.; Pätzold, S.; Peth, S.; Scherer, H.; Schloter, M.; Schneider, H.; Vanderborght, J.; Vetterlein, D.; Walter, A.; Wiesenberger, G.; Köpke, U. 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 57:1003-1022.
45. Lillesand, T. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 5<sup>th</sup>. ed. New York, Wiley. 812 p.
46. Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*. 1:273-294
47. Mandal, L. N. 1984. Soil research in relation to rice. *Rice Journal of the Indian Society of Soil Science*. 32:575-582.
48. Martino, D. 1994. *Agricultura sostenible y siembra directa*. Montevideo, INIA. 31 p. (Serie Técnica no. 50).
49. \_\_\_\_\_. 1997. *Siembra directa en los sistemas agrícola ganaderos del litoral*. Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 82)
50. \_\_\_\_\_. 1998. Restricciones físicas de suelo para la expresión de alto rendimientos de trigo en Uruguay. In: *Taller Explorando Altos Rendimientos de Trigo (1997, La Estanzuela, Colonia)*. Trabajos presentados. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-164.

51. \_\_\_\_\_; Ponce de León, F. 1999. Canola: una alternativa promisorio. Montevideo, INIA. 98 p. (Serie Técnica no. 105)
52. \_\_\_\_\_. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz Roselló, R. ed. Siembra directa en el cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 225-257.
53. MGAP. DSA. DIRENARE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. División de Suelos y Aguas. Dirección Nacional de Recursos Naturales, UY). 2006. Compendio actualizado de información de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1: 1.000.000. 1 disco compacto.
54. Molfino, J. 2013. Potencial agrícola, algunos cálculos para agricultura en secano. Cangüé. no. 33:14-18.
55. 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.
56. Otegui, M.; Andrade, F.; Suero E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. Field Crops Research. 40:87-94.
57. Parish, D. 1971. Soil conditions as they affect plant establishment, root development and yield: effects of compaction on nutrient supply to plants. In: Barnes, K. K. ed. Compaction of Agricultural Soils. St. Joseph, MI, ASAE. pp. 277-291.
58. Pérez Gomar, E.; García Préchac, F. 1993. Manejo de suelos arenosos de Tacuarembó. Montevideo, INIA. 22 p. (Serie Técnica no. 33)
59. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Marchesi, C. 2006. Síntesis de resultados experimentales en el manejo de suelos arenosos en sistemas de producción agrícola-ganaderos. Montevideo, INIA. 233 p. (Serie Técnica no. 159)
60. 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. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 102 p.

61. Radford, B. J.; Yule, D. F.; Mc Garry, D.; Playford, C. 2001. Crop responses to tilled soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil and Tillage Research*. 61:157-166.
62. Renger, M. 1974. Bodenkundliche Kriterien für die Auswahl von Verfahren der Tiefenbearbeitung auf meliorationsbedürftigen Standorten. *Landbauforschung Völkenrode*. 24:1-14.
63. \_\_\_\_\_; Strebel, O. 1976. Der Einfluss des Klimas auf die Tiefenbearbeitbarkeit meliorationsbedürftiger Böden. *Kali-Briefe. Fachgebiet 7. Boden- und Landeskultur* 13:1-10.
64. Rubio, V.; Gama, D.; Pérez, M.; Quincke, A. 2018. Evaluación del intervalo hídrico óptimo en un brunosol éutrico típico bajo diferentes intensidades de uso agrícola. *Agrociencia (Uruguay)*. 22(1):107-115.
65. 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.
66. Sasal, M. C.; Andriulo, A. E.; Boizard, H.; Léonard, J.; Wilson, M. G. 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*. 173:33-41.
67. Sawchik, J. 2007. Algunas restricciones físicas e hídricas para el crecimiento de los cultivos en Uruguay. In: Díaz Roselló, 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.
68. Schneider, F.; Axel, D.; Hennings, I.; Schmittmann, O.; Seidel, S. 2017. The effect of deep tillage on crop yield. What do we really know? *Soil and Tillage Research*. 174:193-204.
69. Sene, M.; Vepraakas, M.; Naderman, G.; Denton, H. 1985. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal*. 49:422-427.

70. 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
71. Soane, G.; Goodwin, R.; Marks, M.; Spoor, G. 1987. Crop and soil response to subsoil loosening, deep incorporation of phosphorus and potassium fertilizer and subsequent soil management on a range of soil types. Part 2: Soil structural conditions. *Soil Use Management*. 3:123-130.
72. Sojka, R.; Home, D.; Ross, C.; Baker, C. 1997. Subsoiling and surface tillage effects on soil physical properties and forage oat stand and yield. *Soil and Tillage Research* 40:125-144.
73. Taboada, M. A.; Lavado, R. S.; Camilión, M. C. 1988. Cambios volumétricos en un Natracuol Típico. *Ciencia del Suelo*. 6:151-157.
74. Tasistro, A.; López, W.; Reynoso, R.; López, J.; Camas, R. 2018. Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9:65-79.
75. Taylor, H. M.; Gardner, H. R. 1963. Penetration of Cotton seeding taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science*. 96:153-156.
76. Threadgill, E. D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transaction of the ASAE*. 25(4):859-863
77. 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.
78. Tourn, S.; Agostini, M.; Studdert, G. 2014. Paraplow y cultivos de cobertura; efecto sobre algunas propiedades físicas bajo siembra directa. (en línea). Buenos Aires, Argentina, s.e. 11 p. Consultado 18 oct. 2017. Disponible en <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/paraplow -cultivos-cobertura-efecto-t31629.htm>

79. Vartapetian, B. B. 1993. Plant physiological responses to anoxia. In: Buxton, D. R. ed. International Crop Science. Madison, WI, CSSA. pp. 721-726.
80. Vehimeter, F. J.; Hendrikson, A. 1948. Soil density and root penetration. Soil Science. 65:488-493
81. Vepraskas, M.; Miner, G. 1986. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. Soil Science Society of American Journal. 50:423-427.
82. \_\_\_\_\_. 1988. Bulk Density Values Diagnostic of Restricted Root Growth in Coarse-textured Soils. Soil Science Society of American Journal. 52:1117-1121.
83. Wolkowski, R. P. 2000. Efficacy of deep tillage in Wisconsin. In: Wisconsin Crop Management Conference (2000, Madison, WI). Proceedings. Madison, WI, University of Wisconsin. Department of Soil Science. Extension Division. s.p.
84. Zhao, G.; Mu, X.; Wen, Z.; Wang, F.; Peng, G. 2013. Soil erosion, conservation, and Eco-environment changes in the Loess Plateau of China. Land Degradation and Development. 24:499-510.