

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOLLISOL FRANCO BAJO  
DISTINTOS MANEJOS DE RASTROJO**

**PABLO CÉSAR TAPIA ROA**

**SANTIAGO-CHILE**  
**2021**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOLLISOL FRANCO BAJO DISTINTOS  
MANEJOS DE RASTROJO**

**MECHANICAL BEHAVIOR OF A LOAMY MOLLISOL UNDER DIFFERENT  
STUBBLE MANAGMENT**

**PABLO CÉSAR TAPIA ROA**

**SANTIAGO-CHILE**  
**2021**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOLISOL FRANCO BAJO DISTINTOS  
MANEJOS DE RASTROJO**

Memoria para optar al título profesional de  
Ingeniero Agrónomo

**PABLO CÉSAR TAPIA ROA**

PROFESOR GUÍA		CALIFICACIONES
Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.		6,5
<b>PROFESORES EVALUADORES</b>		
Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr.		6,0
Sr. Erwin Aballay E. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph. D.		6,7

**SANTIAGO-CHILE**  
**2021**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
Objetivo general .....	4
<b>MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	5
Lugar de estudio .....	5
Tratamientos y diseño estadístico.....	5
Procedimiento.....	6
Muestreo .....	6
Evaluaciones .....	6
Análisis estadístico .....	8
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	9
Características del sitio de estudio .....	9
Textura, clase textural y materia orgánica (MO).....	9
Densidad real (Dr), densidad aparente (Da) y número poroso (e) .....	11
Distribución de tamaño de poros .....	12
Propiedades mecánicas .....	14
Consolidación .....	14
<b>CONCLUSIONES</b> .....	21
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	22

## RESUMEN

Se realizó un ensayo en un suelo franco (Entic Haploxeroll) manejado bajo labranza convencional, evaluando la deformación del sistema poroso al ser sometido a distintos manejos de rastrojo (paja de trigo de la temporada anterior): T1: manejo convencional con incorporación de rastrojo ( $6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ); T2: manejo convencional con incorporación de alta dosis de rastrojo ( $36 \text{ Mg ha}^{-1}$ ); T3: manejo convencional con incorporación de rastrojo ( $6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y aplicación de ácido húmico ( $15 \text{ kg ha}^{-1}$ ), los cuales fueron contrastados con un testigo bajo cero labranza (T4). Se tomaron muestras de suelo de 0 a 15 cm de profundidad en dos momentos de la temporada (3 y 7 meses después de la incorporación del rastrojo), evaluándose el contenido de materia orgánica, densidad aparente, distribución de tamaño de poros y consolidación, esta última mediante muestras confinadas con drenaje libre y en condición húmeda ( $-6 \text{ kPa}$ ) y seca al aire. El contenido de materia orgánica disminuyó en la segunda fecha de evaluación, con una disminución estadísticamente significativa en T2. La densidad aparente mostró una alta variabilidad, con valores de 1,17 a  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ , sin diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. En la fecha 1, los poros de drenaje lento (PDL) fueron significativamente mayores en T1 y T3 respecto a T4. También se observó un aumento significativo en los PDL hacia la fecha 2, excepto en el T3. La consolidación presentó una mayor deformación en el rango de cargas bajas y en muestras húmedas, aunque sin diferencias entre tratamientos, en tanto en el rango de cargas altas la deformación se homogeniza entre tratamientos y en el tiempo. La capacidad de soporte fue mayor en T4 (fecha 1) y T1 (fecha 2) en condición húmeda, en función del asentamiento natural de las partículas, denotando la dinámica de mineralización de la materia orgánica del rastrojo.

**Palabras Claves:** Capacidad de soporte, porosidad de suelo, sistema de labranza, deformación plástica.

## ABSTRACT

An essay was performed in a loamy soil (Entic Haploxerolls) under conventional tillage, evaluating the deformation of the pore system with different stubble management (wheat stubble during previous season): T1: conventional tillage with stubble ( $6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ); T2: conventional tillage with a high amount of stubble ( $36 \text{ Mg ha}^{-1}$ ); T3: conventional tillage with stubble ( $6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and humic acid ( $15 \text{ kg ha}^{-1}$ ), contrasting them with a control under zero tillage management (T4). Soil samples were taken at 0-15 cm depth in two moments of the season (3 and 7 months after stubble incorporation), evaluating organic matter content, bulk density, pore size distribution and consolidation, the last one through confined samples with free drainage and two water conditions ( $-6 \text{ kPa}$  and air dried). The organic matter content decreased in the second date, with statistically significant differences in T2. The bulk density shown a high variability, with values ranging from  $1.17$  to  $1.43 \text{ Mg m}^{-3}$ , without differences between treatments. On the Date 1, slow draining pores (SDP) at T1 and T3 presented statistically significant differences compared to T4. There was also a significant increase SDP on Date 2, except for T3. Consolidation tests shown higher deformation in low-range normal loads and wet condition, but without differences between treatments, while in the range of high normal loads, the deformation becomes homogeneous between treatments and over time. The bearing capacity was higher in T4 (date 1) and T1 (date 2) in humid condition, as a function of the natural settlement of the particles, denoting the mineralization dynamics of the organic matter of the stubble.

**Keywords:** Bearing capacity, soil porosity, tillage system, plastic deformation.

## INTRODUCCIÓN

Históricamente la agricultura ha evolucionado con el fin de satisfacer la demanda creciente de alimentos por parte de la humanidad; esta evolución ha ido de la mano con el aumento en los conocimientos y de la incorporación de nuevas tecnologías que permiten una mejora en los rendimientos (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Una de estas mejoras es la inclusión de maquinarias e implementos que facilitan las labores de labranza; sin embargo, tales equipos tienen también directa relación con el aumento de la compactación, tanto así que se estima que alrededor de 68 millones de hectáreas de suelos han sido compactadas por exceso de tránsito de maquinaria agrícola (Hamza y Anderson, 2005).

La compactación de los suelos ha sido reconocida como un grave problema, ya que contribuye a la degradación del recurso, tanto en la agricultura como en las actividades forestales, ambas con inclusión de maquinaria pesada para la cosecha (Ansorge y Godwin, 2006). Algunas de las consecuencias de la compactación de suelos es el cambio en la distribución del tamaño de poros, hacia tamaños finos, lo que aumenta la escorrentía y la denitrificación de suelos, afecta a la emergencia y enraizamiento de las plantas y causa disminución de la difusión de oxígeno, entre otros efectos (Czyz, 2004; Peng *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2009).

La compactación se puede entender como un proceso dinámico en el cual se produce una compresión del suelo, disminuyendo el espacio entre las partículas a costa de la pérdida de porosidad, aumentando así la densidad aparente (Hakansson, 2005). Si bien la densificación del suelo puede ocurrir de manera natural a través de aportes sedimentarios o por la iluviación de arcillas que taponan el espacio poroso (Jaramillo, 2002), es el factor antrópico el que ha contribuido a la aceleración de este proceso en los suelos de uso agrícola (Porta *et al.*, 2003).

La resistencia que pueda tener un suelo a la compactación se puede medir mediante pruebas de presión-tensión (conocida también como prueba de consolidación), en la cual se aplican presiones crecientes conocidas y se mide la deformación del suelo (Kézdi, 1980). A partir de ellas se puede obtener el valor de precompresión o capacidad de soporte (Horn *et al.*, 1994). Si la presión externa aplicada no excede a este valor, la reacción del suelo es del tipo elástica, por lo que se recupera una vez retirada la carga; por otro lado, si la presión excede a este límite, ocurre una deformación de tipo plástica (Horn *et al.*, 2007). Bajo las mismas características climáticas y de manejo de suelo, los valores de capacidad de soporte varían dependiendo de la textura, el grado de agregación y el potencial mátrico (Horn *et al.*, 1995).

Según Kézdi (1980), un suelo tiene un mayor potencial de sufrir compactación si dominan las arcillas en su matriz y, por el contrario, tiene una menor susceptibilidad a la compactación si predomina la fracción arena. Por otra parte, al comparar suelos con igual clase textural, se espera una mayor capacidad de soporte, y por ende una menor compresibilidad, en aquellos que presenten mejor estructuración (Horn *et al.*, 1995).

La estructura se refiere al arreglo o disposición de las partículas de suelo en unidades formadas por acción natural, mediadas por los ciclos estacionarios de humectación y secado, los cuales resultan en la contracción y dilatación de la matriz de suelo (Hillel, 1980). A esto se suma la acción de la materia orgánica proveniente de residuos orgánicos, exudados de raíces y acción microbiológica, las cuales favorecen la formación y estabilidad de estas unidades, llamadas agregados (Chaney y Swift, 1986, Kutsch *et al.*, 2009). La resistencia que puedan presentar estas unidades a las presiones externas es fundamental para evitar la compactación, ya que su matriz porosa no se ve afectada a ciertas cargas que sí afectan la matriz porosa inter agregados (Horn *et al.*, 1995). Superada la resistencia del agregado, este comienza a sufrir deformación y desagregación, con tendencia a un estado masivo, pero si se suman nuevos ciclos de humectación y secado pueden resultar en un nuevo ciclo de formación de estructura (Six *et al.*, 2004).

La importancia de la materia orgánica en el suelo, desde el punto de vista físico, está dada por favorecer la estabilidad estructural en la matriz de suelo, propiciando la entrada de agua al sistema y la retención de esta (Julca-Otiniano *et al.*, 2006). La formación de los agregados está condicionada por procesos mecánicos y biológicos, facilitado por la presencia de sustancias orgánicas que actúan como agentes cementantes en la unión de partículas más pequeñas o micro agregados (Horn y Smucker, 2005). Esta asociación funciona como protección del agregado frente a la humectación repentina (Hallet, 2008); por lo tanto, un aumento de la materia orgánica del suelo favorece la formación de agregados estables, manteniendo la persistencia de la porosidad gruesa (espacio inter agregado). Zhang *et al.* (2005) señalan al respecto que la aplicación de materia orgánica en suelos con un amplio rango de clases texturales mejora la resistencia y la capacidad elástica del suelo; esto se traduce en una mayor resiliencia, la cual explica la capacidad de recuperación una vez retirada la presión externa a la cual es sometido el suelo. Los autores señalan también que la respuesta es mayor cuando la materia orgánica se encuentra más humificada, por lo que el uso de una enmienda a base de ácido húmico debiese potenciar los efectos positivos en el suelo durante la mineralización de los rastrojos de cosecha, tal como lo demostró Marín (2011) en un estudio de estabilización de camellones en suelos con bajo contenido de materia orgánica. Por lo tanto, y según lo explica Mulumba y Lal (2008), el manejo del rastrojo de cultivos anteriores podría resultar benéfico para la estabilidad físico-mecánica del suelo, aumentando la porosidad total, la estabilidad de los agregados, la capacidad de retención de agua y eventualmente la capacidad de soporte.

### **Objetivo**

Comparar la capacidad de soporte, deformación y sistema poroso de un suelo bajo labranza convencional sometido a distintos manejos de rastrojo en relación a su símil bajo cero labranza.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Lugar de estudio

El ensayo se realizó durante el año 2014 en las dependencias de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, en el sector de Sistemas de Labranza, dependiente del Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta. Dicho sector ha estado bajo manejos de labranza cero y convencional durante 17 años, cultivado con distintas rotaciones.

El suelo pertenece, según CIREN (1996), a la Serie Santiago (STG), miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (Mollisol). Se señala, además, que es un suelo de origen aluvial, ligeramente profundo, de topografía plana en posición de un gran cono aluvial.

Según Uribe *et al.* (2012) el clima del lugar está clasificado como templado cálido (Mediterráneo), con estación seca prolongada (7 a 8 meses), precipitaciones invernales de 366 mm y temperatura media anual de 14°C, en donde el mes más cálido es enero y el mes más frío es julio, con promedios máximos de 29,1°C y mínimos de 3,3°C respectivamente.

### Tratamientos y Diseño de Experimento

En una distribución en bloques completamente aleatorizado, se escogieron 9 parcelas de 1m x 2m en las que existía rastrojo de trigo de la temporada previa (manejo convencional). Sobre éstas se aplicaron los tratamientos T1, T2 y T3 detallados en el Cuadro 1, cada uno con tres repeticiones.

**Cuadro 1.** Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Manejo	Condición	Cultivo
T1	Convencional	Solo Rastrojo	Haba
T2	Convencional	Exceso Rastrojo	---
T3	Convencional	Rastrojo + Ácido Húmico	Haba
T4	Cero Labranza	Rastrojo en superficie	---

A esto se le suman otras 3 parcelas de 1m x 2m distribuidas al azar en un sector de cero labranza, próximo al sitio bajo labranza convencional. Las parcelas constituyeron las unidades experimentales (4 tratamientos, 3 repeticiones), las que se distribuyeron en un área de 50 x 80 m<sup>2</sup>. En dos de los tratamientos se sembró haba (*Vicia faba sp*) en la temporada 2014; no se incluyó el T2 debido a que es un tratamiento que busca asegurar

traficabilidad de futuras huellas de tránsito, sin un fin productivo. El rastrojo utilizado corresponde a los restos de la cosecha anterior de trigo y se estima en torno a  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  en T1 y T3. Para el T2 se simuló un exceso de este mismo rastrojo, es decir, al rastrojo ya existente se aplicaron 6 kilogramos más provenientes del mismo campo, dando como resultado un equivalente de  $36 \text{ Mg ha}^{-1}$ . El ácido húmico utilizado corresponde a POW Humus (WSG, 85%) de la empresa alemana Humin Tech y se aplicó en dosis de  $1,5 \text{ g m}^{-2}$ , equivalente a una dosis de  $15 \text{ kg ha}^{-1}$ , los cuales fueron diluidos en 10 L de agua, para facilitar su incorporación, siendo asperjados sobre la unidad experimental.

## Procedimiento

En marzo de 2014, el suelo de los tratamientos T1, T2 y T3 fue preparado para el nuevo cultivo mediante arado y rastra de disco, incorporando el rastrojo existente. El día 20 de abril del mismo año se aplicó la dosis de ácido húmico a las 3 repeticiones del tratamiento T3, dos días después se realizó la siembra de haba. El exceso de rastrojo correspondiente al tratamiento T2 se incorporó manualmente el 2 de mayo. El sitio con cero labranza no fue sembrado en la correspondiente temporada, pues dentro del manejo estaba planificado transformarlo a labranza convencional.

## Muestreo

El día 19 de junio (Fecha 1) se tomaron 3 muestras de los primeros 15 cm de suelo por cada una de las unidades experimentales; 2 para prueba de consolidación (cilindros de 9,9 cm de diámetro y 3 cm de altura) y una para determinar curva característica (cilindro de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura). Además, de cada parcela se extrajeron cerca de 500 gr de muestra de suelo disturbado, la cual fue utilizada para determinar características físicas del suelo y contenido de materia orgánica.

Se realizó un segundo muestreo el 17 de octubre del año 2014 (Fecha 2), con las mismas características del primer muestreo.

## Evaluaciones

Como caracterización general se midió la distribución de tamaño de partículas por el método del hidrómetro de Bouyoucos y la densidad real por el método del picnómetro (Sandoval et al., 2012). La densidad real se midió solo en las muestras de la primera fecha, ya que se considera que esta propiedad es poco variable en el corto plazo (Warrick, 2002).

Para el cálculo de la materia orgánica total del suelo se utilizó el método de calcinación, descrito por Sadzawka *et al.* (2007), en el cual se usaron muestras de suelo disturbadas y secas al aire. Se determinó el contenido de agua mediante secado a  $105^{\circ}\text{C}$ , luego de lo cual

la muestra se ingresó a la mufla, combustionando la materia orgánica a 550°C durante dos horas.

Para las comparaciones de los sistemas porosos de cada tratamiento, se determinó la curva característica (Sandoval *et al.*, 2012), para lo que se contó con 12 muestras para cada fecha (tomadas en los cilindros de 5,9 cm de diámetro) las que fueron puestas en una bandeja con un nivel de agua que las hidrató y estabilizó a -2 hPa; luego pasaron a cama de arena para ser estabilizadas a -60 hPa y posteriormente a olla de presión, equilibrándose a -330 hPa (-33 kPa). Cabe mencionar que luego de cada proceso de estabilización, la muestra fue pesada para determinar los cambios en el contenido de agua. Finalmente, la muestra se llevó a estufa por un día y se volvió a pesar; con la masa seca se calculó la densidad aparente ( $D_a$ ) por el método del cilindro (Sandoval *et al.*, 2012). Con los valores de densidad aparente ( $D_a$ ) y densidad real ( $D_r$ ) se calculó el número poroso ( $e$ ) mediante la relación  $e=(D_r/D_a) -1$ , correspondiente a una expresión de volumen de poros respecto al volumen de sólidos del suelo. Para completar la curva característica con el punto de marchitez permanente (PMP, retención de agua a -1500 kPa) se utilizó una muestra disturbada, equilibrándola en el plato de presión y transformando el contenido gravimétrico ( $P_w$ ) a volumétrico ( $P_v$ ) mediante la relación  $P_v=P_w*D_a$ .

Del análisis descrito por Hartge y Horn (2009) se desprende que los poros de drenaje rápido (PDR,  $> 50 \mu\text{m}$ ) son el resultado de la diferencia entre los contenidos de agua a equilibrios mátricos de -2 y -60 hPa; los poros de drenaje lento (PDL,  $10 - 50 \mu\text{m}$ ) son el resultado de la diferencia de los contenidos de agua entre -60 y -330 hPa; los poros de agua útil (PAU,  $0,2 - 10 \mu\text{m}$ ) son el resultado de la diferencia de los contenidos de agua entre -330 y -15000 hPa; en tanto los poros de agua inútil (PAI,  $< 0,2 \mu\text{m}$ ) corresponden al contenido volumétrico a -15000 hPa (-1500 kPa, equivalente a PMP).

Para la prueba de consolidación, que entrega valores de capacidad de soporte y módulos de deformación y recuperación, se tomaron 24 muestras (2 por cada unidad experimental, tomadas en los cilindros de 9,9 cm de diámetro) de las cuales se dejó la mitad (una por cada repetición) secándose al aire, mientras que la otra mitad fue puesta en una bandeja con un nivel de agua para hidratar las muestras y equilibrarlas a -1 hPa. Al día siguiente, con las muestras hidratadas, éstas fueron pesadas y puestas en la cama de arena para ser equilibradas a -60 hPa. Una vez equilibradas pasaron por el equipo de consolidación, realizando una prueba confinada con drenaje libre (Kézdi, 1980), registrando la deformación de las muestras con un micrómetro. En la prueba la muestra se ubicó entre dos placas metálicas porosas y se le aplicó una carga mecánica mediante aire comprimido. Dicha carga fue en aumento, comenzando con 20 kPa de presión hasta los 500 kPa, dividido en 9 intervalos (20, 40, 60, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 kPa) y dejando cada carga por un tiempo de 5 minutos, hasta que se estabilizara la deformación de la muestra, la cual se registró con el comparador micrométrico. Luego se descargó la muestra en dos intervalos (a 100 y 20 kPa) para registrar la capacidad de recuperación del suelo. Terminada la prueba de consolidación, la muestra fue pesada y puesta en estufa para volver a ser pesada al día siguiente. Las otras 12 muestras dejadas secar al aire siguieron

exactamente el mismo procedimiento, pero sin pasar por cama de arena. Se realizó el mismo procedimiento y toma de muestras para ambas fechas.

Con los datos de consolidación se calcularon módulos de deformación en dos intervalos. Se consideró para el módulo de deformación en baja presión los datos obtenidos entre los 20 y 60 kPa y de deformación en alta presión entre los 200 y 500 kPa. Los módulos fueron calculados dividiendo la diferencia de la pérdida de altura (mm) con la diferencia de la carga aplicada (kPa). Finalmente, los datos expresados en  $\text{mm kPa}^{-1}$  se transforman a  $\mu\text{m kPa}^{-1}$ . Para la desconsolidación se realizó el mismo procedimiento, calculando el módulo de recuperación en todo el intervalo de descarga.

### **Análisis estadístico**

El diseño experimental corresponde a bloques completamente aleatorizados (DBCA) con los tratamientos T1, T2 y T3, entre los que se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) y una prueba Tukey para determinar diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Como el tratamiento T4 se encuentra espacialmente separado de los anteriores, no se consideró parte del bloque, por lo que se comparó directamente con cada uno de los otros tratamientos a través de una prueba t. Para evaluar el comportamiento en el tiempo de los manejos, también se realizó una prueba t, comparando las fechas de muestreo de cada tratamiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del sitio de estudio

Inicialmente se presentan los resultados de propiedades físicas básicas. Es necesario tener presente que, al momento del muestreo en la primera fecha (junio de 2014), habían transcurrido aproximadamente 2 meses desde la aplicación de exceso de rastrojo para el tratamiento T2 y de la aplicación del ácido húmico en el tratamiento T3. Para el segundo muestreo (octubre 2014) habían pasado aproximadamente 6 meses desde las respectivas aplicaciones.

#### Textura, clase textural y materia orgánica

La textura corresponde a las proporciones relativas de las fracciones sólidas del suelo, separadas en arena, limo y arcilla, a partir de las cuales se puede determinar la clase textural (Sandoval *et al.*, 2012). De esta propiedad derivan otras como la capacidad de retención de agua, facilidad de la labranza y potencial de estructuración.

La materia orgánica (MO) en el suelo está compuesta en un 60% de sustancias húmicas, las cuales incluyen los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos (ambos solubles) y las huminas (insolubles), además de un 40% de partículas con estructura celular reconocible, las cuales incluyen materia orgánica disuelta (por ejemplo aminoácidos, azúcares, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos) y biopolímeros no húmicos (por ejemplo proteínas, enzimas, polisacáridos, lípidos y ácidos nucleótidos) (Huang *et al.*, 2012). Si bien resulta interesante la naturaleza de los componentes orgánicos, basta su contenido total para correlacionar bien con propiedades físicas (Jordán *et al.*, 2010; Seguel *et al.*, 2013).

Los resultados de estas propiedades se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Textura, clase textural y contenido de materia orgánica (promedio  $\pm$ DS) de los tratamientos para ambas fechas de muestreo.

Trat.	Textura			Clase Textural (USDA)	MO (%)
	Arena	Limo ------(%)-----	Arcilla		
Fecha 1					
T1	37,3 ( $\pm$ 0,3)	37,2 ( $\pm$ 0,4)	25,5 ( $\pm$ 0,2)	F	3,44 ( $\pm$ 0,2)
T2	38,1 ( $\pm$ 2,0)	36,6 ( $\pm$ 1,0)	25,2 ( $\pm$ 1,0)	F	3,26 ( $\pm$ 0,2) A
T3	36,2 ( $\pm$ 0,8)	37,4 ( $\pm$ 0,8)	25,9 ( $\pm$ 1,4)	F	3,43 ( $\pm$ 0,0)
T4	32,2 ( $\pm$ 2,2)	33,0 ( $\pm$ 1,8)	34,9 ( $\pm$ 1,8)	FA	3,74 ( $\pm$ 0,3)
Fecha 2					
T1	37,9 ( $\pm$ 2,0)	37,5 ( $\pm$ 1,6)	24,7 ( $\pm$ 0,7)	F	2,99 ( $\pm$ 0,4)
T2	38,1 ( $\pm$ 0,1)	35,6 ( $\pm$ 1,8)	26,2 ( $\pm$ 1,8)	F	2,76 ( $\pm$ 0,1) B
T3	38,4 ( $\pm$ 2,1)	36,7 ( $\pm$ 1,7)	24,9 ( $\pm$ 0,6)	F	3,00 ( $\pm$ 0,5)
T4	32,6 ( $\pm$ 1,8)	31,4 ( $\pm$ 1,6)	36,0 ( $\pm$ 0,6)	FA	3,15 ( $\pm$ 0,3)

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre fechas para un mismo tratamiento ( $p < 0,05$ ).

F: Franca; FA: Franco arcillosa; MO: Materia orgánica.

T1: Rastrojo dosis normal; T2: Rastrojo en exceso; T3: Rastrojo + Ácido húmico; T4: Cero Labranza

De acuerdo al triángulo textural USDA (Schoeneberger *et al.*, 2012) el suelo en el cual se encontraban T1, T2 y T3 es de textura franca; por su parte, el suelo bajo cero labranza presenta textura franco arcillosa. Como era de esperar, ninguno de los tratamientos presenta cambios en las fechas estudiadas, ya que la textura es una propiedad altamente estable en el tiempo (Warrick, 2002); sin embargo, existen diferencias en la clase textural de T1, T2 y T3 con respecto a T4, a pesar de encontrarse en sitios aledaños pertenecientes a la misma Serie de suelos. Esto se explica por el efecto de la labranza, la cual mezcla el horizonte superficial con el subsuelo, el cual según CIREN (1996) presenta texturas más gruesas, lo que genera el incremento de arena en desmedro de la proporción de arcilla.

La materia orgánica (MO) por su parte no registró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, siendo la cero labranza la que presenta los mayores niveles en ambas fechas, tal como lo determinó Franzluebbbers (2010), quien señala que en sitios bajo cero labranza, la ausencia de disturbación por labranza favorece la acumulación de materia orgánica en superficie. Si bien se esperaría un mayor contenido de MO en T2 fecha 2 (Exceso de rastrojo) esto no ocurrió, debido a que el periodo entre los muestreos fue insuficiente para que todo ese rastrojo se descompusiera, dada su alta relación C/N (Abiven *et al.*, 2009). Esto implica que al momento de tomar la muestra en la fecha 2 aún había rastrojo, el cual fue eliminado en el tamizaje previo a procesar la muestra, tal como lo indica el procedimiento descrito por Sadzawka *et al.* (2007).

Al considerar el factor tiempo, se observa una tendencia hacia la disminución de la materia orgánica en la segunda fecha de muestreo, con una disminución estadísticamente

significativa en T2 (manejo convencional con exceso de rastrojo). La primera fecha de muestreo corresponde a época de invierno, con bajas temperaturas, por lo que la actividad biológica se reduce y los contenidos de materia orgánica reflejan el remanente de la temporada previa. Al aumentar la temperatura en primavera, se reactiva la actividad biológica, por lo tanto, se ve favorecida la mineralización de la MO del suelo (Salazar *et al.*, 2015), quedando los nutrientes disponibles para los cultivos. Este proceso podría explicar la disminución del contenido de MO en la Fecha 2, quedando los productos secundarios de la mineralización disponibles para la estabilización de la estructura del suelo (Abiven *et al.*, 2009).

### Densidad real, densidad aparente y número poroso

La densidad real ( $D_r$ ) o de partículas, es la densidad de la fase sólida del suelo (Sandoval *et al.*, 2012) por lo que excluye el espacio poroso. Por su parte, la densidad aparente ( $D_a$ ) considera la masa de sólidos dividida por el volumen de suelo, lo que incluye a la porosidad de los agregados y al espacio inter agregados (Warrick, 2002). Si bien es una propiedad de naturaleza estática (Horn y Flaige, 2009), es lo suficientemente sensible como para detectar cambios por uso y manejo en el corto plazo (Osunbitan *et al.*, 2005). Así mismo, un manejo que supere la capacidad de soporte del suelo disminuirá su espacio poroso, reordenando las partículas y generando un aumento de la densidad aparente (Rubio, 2010).

Por su parte, el número poroso ( $e$ ) relaciona el volumen de poros respecto al volumen de los sólidos, permitiendo comparar directamente los cambios que se generan como consecuencia de los distintos manejos (Hartge y Horn, 2009).

Los resultados obtenidos para estas propiedades se presentan en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Valores de densidad real ( $D_r$ ), densidad aparente ( $D_a$ ) y número poroso ( $e$ ) (promedio  $\pm$ DS) de los tratamientos en las dos fechas de muestreo.

Tratamientos	$D_r$ ( $Mg\ m^{-3}$ ) <sup>a</sup>	$D_a$ ( $Mg\ m^{-3}$ )	$e$ ( $cm^3\ cm^{-3}$ )
Fecha 1			
T1	2,75 ( $\pm 0,03$ ) ab	1,40 ( $\pm 0,09$ )	0,96 ( $\pm 0,13$ )
T2	2,57 ( $\pm 0,09$ ) a	1,17 ( $\pm 0,23$ )	1,19 ( $\pm 0,43$ )
T3	2,89 ( $\pm 0,08$ ) b	1,23 ( $\pm 0,23$ )	1,33 ( $\pm 0,20$ )
T4	2,73 ( $\pm 0,04$ ) ab	1,39 ( $\pm 0,10$ )	1,17 ( $\pm 0,27$ )
Fecha 2			
T1		1,20 ( $\pm 0,08$ )	1,29 ( $\pm 0,18$ )
T2		1,29 ( $\pm 0,06$ )	0,99 ( $\pm 0,17$ )
T3		1,43 ( $\pm 0,13$ )	1,02 ( $\pm 0,23$ )
T4		1,28 ( $\pm 0,06$ )	1,35 ( $\pm 0,11$ )

<sup>a</sup>Densidad real fue medida solo en la primera fecha de muestreo. Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

Respecto a la densidad real ( $D_r$ ), se observaron diferencias estadísticamente significativas, con valores menores en T2 (exceso de rastrojo) respecto a T3 (rastrojo + ác. Húmico). Al ser la densidad real una característica de suelo dependiente de la naturaleza de las partículas, se espera que la variación de esta sea mínima, ya que la composición mineralógica de los sitios es la misma. Sin embargo, la aplicación de rastrojos se manifestó con una disminución de la  $D_r$  en T2, dado el menor valor de densidad de los sólidos orgánicos, tal como lo indican Sandoval *et al.* (2012) para aplicaciones orgánicas mayores a  $30 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Por otra parte, para suelos de mineralogía cristalina, se esperan valores de  $D_r$  cercanos a  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , valor cercano a la  $D_r$  del cuarzo, mineral común en los suelos (Jury y Horton, 2004). Sin embargo, es posible obtener valores mayores cuando existe una importante presencia de minerales de hierro y micas de origen primario (Schaeztl y Anderson, 2005), lo que se manifestó en este caso, consistente con los resultados de Cerda (2015) en el mismo sitio de estudio.

Respecto a la densidad aparente ( $D_a$ ), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en una misma fecha ni tampoco se observaron diferencias entre las fechas estudiadas. Sin embargo, las tendencias indican un efecto de las enmiendas orgánicas en el corto plazo, con los menores valores en T2 y T3 en la primera fecha de evaluación, aunque con una alta variabilidad. Sin embargo, la segunda medición marca una tendencia contraria a lo revisado por varios autores (Sparovek *et al.*, 1999; Carter, 2002; Seguel *et al.*, 2013), quienes afirman que un aporte de materia orgánica se traduce en una disminución de la  $D_a$ . Esta situación se observó en T2 y T3 solo en la primera fecha de medición; sin embargo, la mineralización de la MO y su disminución en el tiempo provocaron un asentamiento del suelo, con un incremento de la  $D_a$ .

Respecto al número poroso ( $e$ ), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de una misma fecha ni tampoco se observaron diferencias entre las fechas estudiadas. Sin embargo, se puede observar una tendencia que indicaría un efecto en el corto plazo de las enmiendas orgánicas en el tratamiento T2 y T3, con los mayores valores en la fecha 1. Este efecto era de esperarse, ya que la densidad aparente mostró una tendencia que indica el efecto de las enmiendas para esos tratamientos, condición que no se mantuvo en el tiempo.

### **Distribución de tamaño de poros**

El suelo se considera como una matriz porosa en la cual se encuentran una fase sólida, una líquida y una gaseosa (Warrick, 2002). El espacio poroso (EP) corresponde a los vacíos de esta matriz en donde interactúan el agua y el aire con las raíces. Como el EP solo entrega un valor total de los espacios vacíos de una muestra de suelo, se midió el contenido volumétrico de agua a diferentes tensiones, con el fin de poder determinar la distribución de tamaño de poros. Los resultados para ambas fechas se presentan en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Distribución de tamaño de poros (% , promedio  $\pm$ DS) de los tratamientos para ambas fechas de muestreo.

Tratamientos		Porosidad (%)	
		Fecha 1	Fecha 2
		<b>PDR (&gt;50 <math>\mu</math>m)</b>	
T1	Convencional + Rastrojo	15,4 ( $\pm$ 2,4)	17,5 ( $\pm$ 0,8)
T2	Convencional + Exceso de Rastrojo	16,7 ( $\pm$ 3,4)	15,8 ( $\pm$ 3,1)
T3	Convencional + Rastrojo + Ác. Húmico	18,9 ( $\pm$ 2,0)	14,3 ( $\pm$ 3,7)
T4	Cero Labranza	13,5 ( $\pm$ 3,8)	15,5 ( $\pm$ 2,8)
		<b>PDL (10-50 <math>\mu</math>m)</b>	
T1	Convencional + Rastrojo	7,8 ( $\pm$ 0,3) a B	9,7 ( $\pm$ 0,1) A
T2	Convencional + Exceso de Rastrojo	6,8 ( $\pm$ 2,0) ab	8,8 ( $\pm$ 0,7)
T3	Convencional + Rastrojo + Ác. Húmico	7,5 ( $\pm$ 0,8) a B	10,4 ( $\pm$ 0,6) A
T4	Cero Labranza	5,2 ( $\pm$ 0,5) b B	8,0 ( $\pm$ 1,6) A
		<b>PAU (0,2-10 <math>\mu</math>m)</b>	
T1	Convencional + Rastrojo	15,2 ( $\pm$ 1,0)	16,0 ( $\pm$ 1,4)
T2	Convencional + Exceso de Rastrojo	15,2 ( $\pm$ 1,0)	16,6 ( $\pm$ 0,3)
T3	Convencional + Rastrojo + Ác. Húmico	13,6 ( $\pm$ 1,9) B	19,2 ( $\pm$ 1,1) A
T4	Cero Labranza	14,2 ( $\pm$ 1,1) B	19,7 ( $\pm$ 1,4) A
		<b>PAI (&lt; 0,2 <math>\mu</math>m)</b>	
T1	Convencional + Rastrojo	10,4 ( $\pm$ 1,0) b	8,7 ( $\pm$ 1,1) b
T2	Convencional + Exceso de Rastrojo	8,7 ( $\pm$ 1,8) b	9,7 ( $\pm$ 0,5) b
T3	Convencional + Rastrojo + Ác. Húmico	9,5 ( $\pm$ 1,0) b	9,1 ( $\pm$ 0,8) b
T4	Cero Labranza	13,3 ( $\pm$ 0,3) a	12,9 ( $\pm$ 1,4) a

Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en la misma fecha y tamaño de poros ( $p < 0,05$ ).

Letras mayúsculas diferentes en una fila indican diferencias estadísticas significativas en un mismo tratamiento entre diferentes fechas ( $p < 0,05$ ).

Al comparar entre tratamientos, los resultados del Cuadro 4 indican que en los poros de drenaje rápido (PDR) y los poros de agua útil (PAU) no existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ambas fechas; respecto a los poros de drenaje lento (PDL), existieron diferencias estadísticamente significativas solo en la fecha 1, en donde T1 y T3 presentaron mayor porcentaje que T4. En los poros de agua inutilizable (PAI), existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en ambas fechas, siendo T4 el que presentó mayor porcentaje que el resto de los tratamientos, lo que podría ser resultado del mayor contenido de arcilla del sitio bajo cero labranza (Warrick, 2002).

Reynolds *et al.* (2009) señalan que un rango adecuado de PDR está entre los 5 y 10%, lo que le permite al suelo un rápido drenaje de exceso de agua, facilitando el crecimiento radical. Según lo observado en el Cuadro 4, todos los valores de PDR se encuentran por sobre dicho rango, incluso se observan niveles superiores al 10%, valor crítico recomendado por Sellés *et al.* (2012) para cultivos frutales. Se observa además una menor porosidad de drenaje total (PRD+PDL) en cero labranza (T4) respecto al resto de los

tratamientos. Esto se debe a que en cero labranza no se realizan labores que generen una soltura mecánica del suelo, y junto con ello se utiliza una sembradora de mayor masa que en labranza convencional, consolidando el suelo en superficie (Martínez *et al.*, 2008a; Kayser *et al.*, 2013).

Al comparar entre las fechas para cada tratamiento por separado, los resultados indican que los poros de drenaje lento (PDL) aumentaron su porcentaje en los tratamientos T1, T3 y T4 (con una tendencia al incremento en T2), en tanto los poros de agua útil (PAU) aumentaron su porcentaje en los tratamientos T3 y T4.

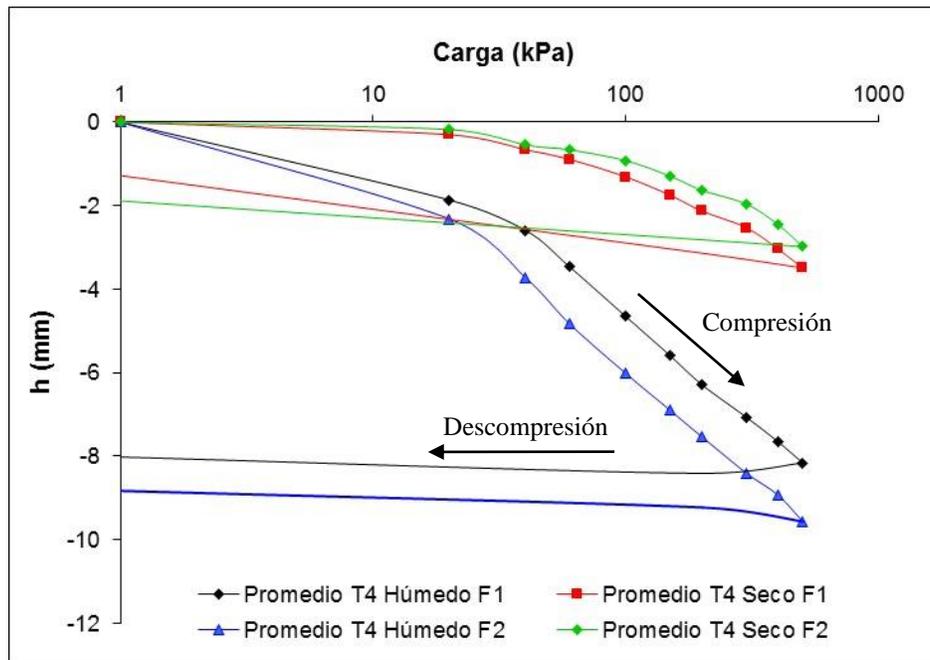
Los procesos de estructuración, favorecidos por los altos contenidos de MO (T4) o por la reactivación microbiológica favorecida por el ácido húmico (T3) generan un incremento en el agua aprovechable en proporción directa al rastrojo dejado en superficie (Osunbitan *et al.*, 2005; Abiven *et al.*, 2009); sin embargo, cuando el residuo orgánico es incorporado en el suelo, la humificación rápida de la MO tiende a formar mesoporos, equivalentes al rango de los PDL (Seguel *et al.*, 2003).

Para el mismo sitio de estudio, Martínez *et al.* (2008b) señalan una distribución de tamaño de poros similar a la encontrada en este estudio, con excepción de los poros de drenaje rápido en el sistema de cero labranza, los cuales presentaron valores en el rango del 5 al 10%. Los mayores niveles de PDR encontrados en el presente estudio responderían a la ausencia de tránsito previo a la reconversión a labranza convencional en el T4.

## **Propiedades Mecánicas**

### **Consolidación**

La Figura 1 muestra 4 curvas de consolidación a modo de ejemplo. En ellas se observa la reducción de altura (h) de una muestra confinada (3 cm de altura) en función del aumento de la carga normal aplicada en intervalos de tiempo regulares.



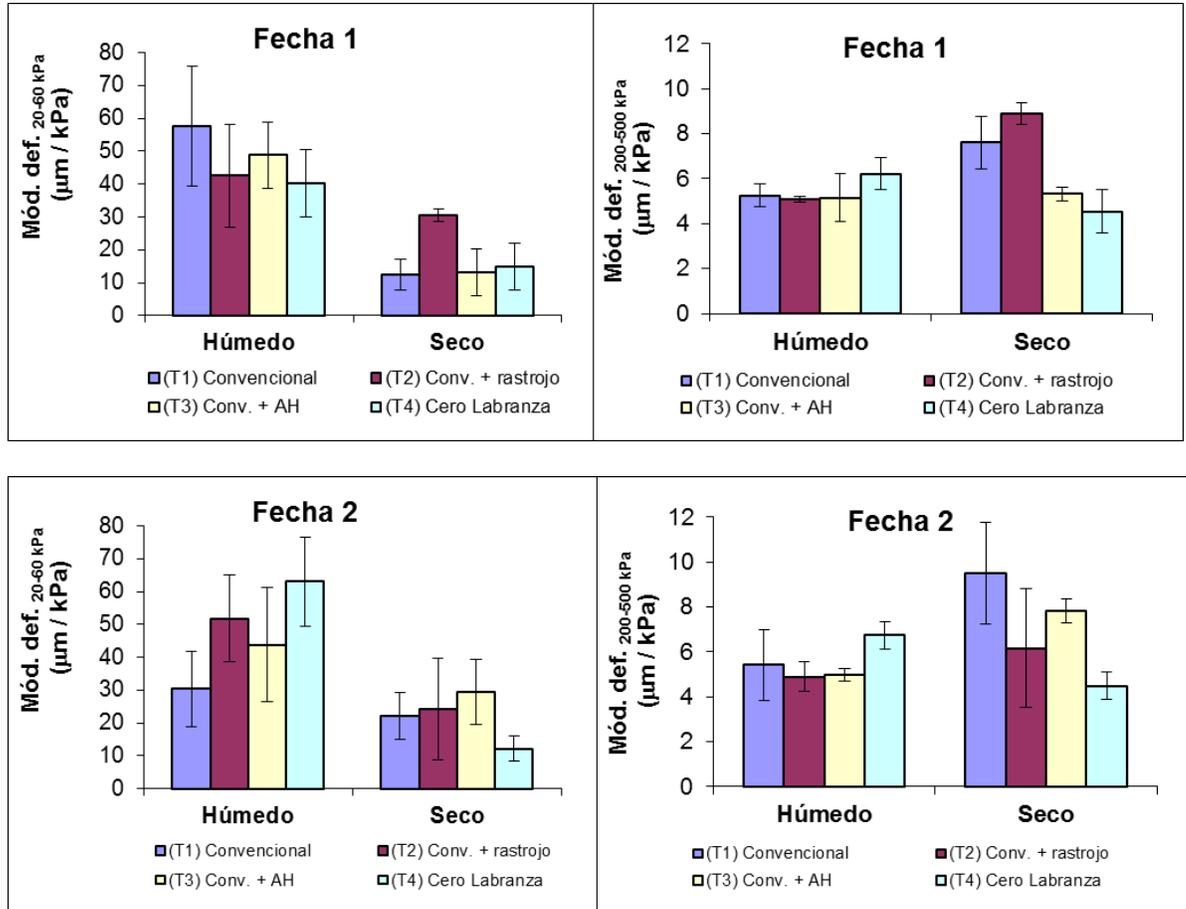
**Figura 1.** Curva de consolidación promedio (h: pérdida de altura) para un mismo suelo en 2 estados de humedad y en dos fechas (F1 y F2). Cada curva corresponde al promedio de las tres repeticiones correspondientes.

El suelo ofrece resistencia a ser comprimido de forma mecánica. Esta resistencia es dependiente de las características intrínsecas del suelo, como la distribución de tamaño de partículas, el contenido de materia orgánica, la densidad aparente, el tamaño y continuidad de poros y el contenido de agua (Horn, 2003).

En la Figura 1 se observa que a medida que se aumenta la presión (Carga normal, kPa), la muestra pierde porosidad (reflejado en una disminución de la altura  $h$ ). En una escala logarítmica para la carga, la pendiente es baja inicialmente, lo que denota el comportamiento elástico del suelo; luego se observa que pasado cierto valor crítico (capacidad de soporte) la pendiente se vuelve más pronunciada, lo cual corresponde al comportamiento plástico (Schäffer *et al.*, 2010). Pasado este valor crítico, la estructura del suelo no puede ser recuperada y por ende la porosidad se pierde de manera irreversible (Tang *et al.* 2009). Al retirar la carga, se observa que la curva de descompresión en su intercepto con el eje Y es menor comparado con la condición inicial (punto 1,0), lo que denota la pérdida de porosidad al finalizar la prueba.

El comportamiento de una baja pendiente al principio y mayor pendiente al final se observa con claridad en la curva de las muestras húmedas, dado que esta condición permite que la muestra se comporte de forma plástica a una menor presión. Por su parte, las muestras de suelo seco presentan agua bajo tensión, lo que aumenta la resistencia de los agregados a la compactación (Seguel y Horn, 2006), presentando una menor deformación y una mayor capacidad de soporte (Horn *et al.*, 2007).

Con los resultados de la curva de compresión obtenidos en la prueba de consolidación, se pueden establecer módulos de deformación de las muestras de suelo (Kézdi, 1980). Estos indican la magnitud de la deformación (en  $\mu\text{m}$ ) que sufrió la muestra confinada en función de un bajo y un alto rango de presión (20-60 kPa y 200-500 kPa respectivamente). En la Figura 2 se observan los módulos de deformación, a baja y alta presión, para los 4 tratamientos en condición húmeda y seca y para ambas fechas de muestreo.



**Figura 2.** Módulos de deformación para rangos de baja presión (izquierda) y alta presión (derecha) para la fecha 1 (arriba) y fecha 2 (abajo) y en condición húmeda y seca. No se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

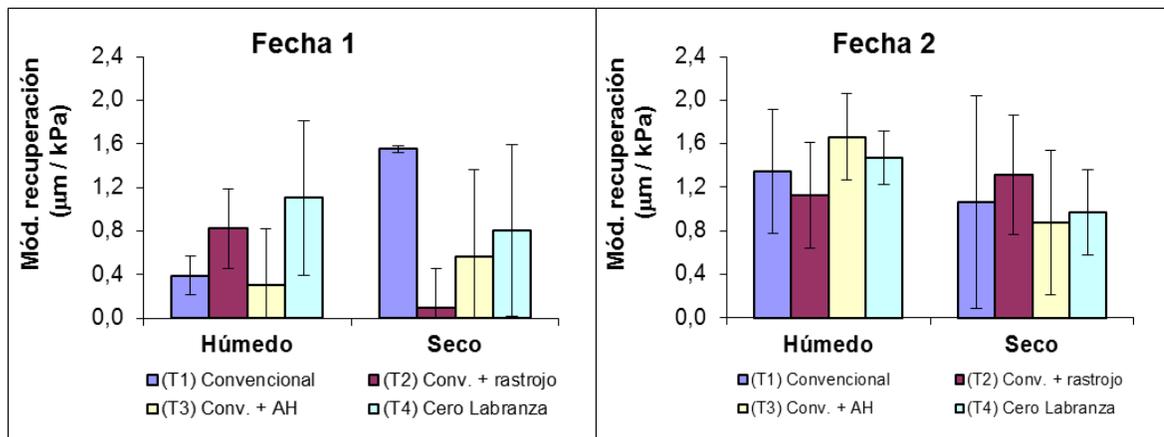
Para el tiempo 1, todos los tratamientos presentaron una alta deformación en el rango de cargas bajas y en condición húmeda. Para la condición seca al aire T1, T3 y T4 presentaron una mayor resistencia en relación a T2 (rastreo en exceso) a ser deformados en el rango de cargas bajas, reflejado en una menor pérdida de altura. T2 en condición seca, por el contrario, presenta un comportamiento similar a su condición húmeda, lo que se explica porque en la muestra aún existen restos frescos de rastreo y la deformación podría corresponder a este material, deformándose con facilidad en un amplio rango de cargas

(Zhang *et al.*, 2005). Las muestras en condición de alta humedad muestran una menor resistencia a ser deformados en el rango de cargas bajas, ya que, como lo explica Schäffer *et al.* (2010), es un comportamiento que se debe a la acción lubricante y solvente propia del agua. Por otra parte, en el rango de cargas altas (Figura 2, arriba a la derecha) se observa una similitud en el comportamiento de los tratamientos, en ambas condiciones de humedad, excepto por T1 y T2 en condición seca, que muestran una tendencia a sufrir una mayor deformación, aunque sin diferencias estadísticamente significativas.

Para el tiempo 2, se mantiene la tendencia de la mayor deformación de las muestras húmedas en el rango de cargas bajas, debido a que previo a superar la capacidad de soporte, existe una alta porosidad gruesa en todos los casos (Cuadro 4), los que colapsan ante niveles de cargas bajas debido a la acción lubricante del agua y su menor estabilidad intrínseca respecto a poros finos al interior de los agregados (Horn *et al.*, 2007). Una vez superada la capacidad de soporte, las deformaciones en el rango de cargas altas disminuyen a la décima parte respecto de la primera zona (cargas bajas) de la curva de consolidación.

El tratamiento T4 en condición seca y en ambas fechas presentó una mayor resistencia a ser deformado en el rango de cargas bajas, reflejado en un menor módulo de deformación que en el rango de cargas altas. Por su parte T1, T2 y T3 en condición seca, presentan un comportamiento similar a sus respectivos tratamientos en condición húmeda en el rango de cargas bajas. Finalmente, en el rango de cargas altas se observa un comportamiento similar entre ambos regímenes de humedad, excepto por el módulo de deformación de T1 y T2, que es mayor en condición seca. Si bien la mayor resistencia (menor deformación) de las muestras húmedas de T1, T2 y T3 a las altas presiones parece contradictorio, la explicación pasa porque la mayor pérdida de altura ocurre a bajas presiones, por lo que al entrar al rango de las altas presiones ya queda menos espacio para ser compactado (Tang *et al.*, 2009). Por su parte, las muestras secas, con mayor resistencia y capacidad de soporte, se deforman menos a bajas presiones, pero una vez superada su capacidad de soporte sufre el colapso del sistema poroso en relación a la estabilidad mecánica de cada caso (Schäffer *et al.*, 2010).

Con los resultados de la curva de descompresión obtenidos en la prueba de consolidación, se puede establecer un módulo de recuperación de las muestras. Estos módulos indican la capacidad de la muestra de recuperar su condición original una vez retirada la carga, como reflejo de su comportamiento elástico. En la Figura 3 se observan los módulos de recuperación para los 4 tratamientos en condición húmeda y seca para las dos fechas de muestreo.



**Figura 3.** Módulo de recuperación para los 4 tratamientos, para la fecha 1 y 2 en condición húmeda y seca. No se registraron diferencias estadísticamente significativas.

De la Figura 3 se puede inferir que no existe una condición de humedad predominante respecto a una mayor recuperación de la muestra de suelo. Para la primera fecha de evaluación, en condición de humedad la mayor recuperación la obtuvo T4 y en condición seca T1, en tanto en la segunda fecha los valores se igualaron entre tratamientos. En este sentido, el tratamiento T2 (exceso de rastrojo) no cumple su objetivo, ya que si bien en la fecha 1 presenta una alta capacidad de deformarse en condición seca (Figura 2), no manifiesta una buena capacidad de recuperación en relación a los demás tratamientos (Figura 3). De acuerdo a Zhang *et al.* (2005), la resistencia mecánica y la recuperación elástica debería aumentar una vez que el rastrojo complete su ciclo de descomposición.

En la Figura 1 se observa la curva de descompresión, que corresponde a la capacidad de resiliencia que tiene la muestra, ya que refleja el comportamiento elástico que le permite recuperar altura una vez retirada la carga (Payahuala y Dörner, 2009). Sin embargo, el suelo presentará una recuperación menor a la inicial si la deformación sufrida es del tipo plástica. El hecho que la deformación sea del tipo elástica o plástica dependerá si la carga aplicada es o no superior a capacidad de soporte (CS) de un suelo, entendida ésta como la carga máxima que define el comportamiento de un suelo desde un comportamiento elástico a uno plástico (Schäffer *et al.* 2010), determinando el punto de inflexión en la curva de consolidación a través de diversos métodos gráficos (Payahuala y Dörner, 2009).

Como en el presente estudio se sobrepasó con creces la capacidad de soporte del suelo, alcanzando cargas normales de 500 kPa (equivalentes a una cosechadora de granos), el sistema poroso se vio seriamente dañado, igualando la capacidad de recuperación entre los tratamientos, indistintamente si se encontraban en una condición húmeda o seca. Sin embargo, existe una tendencia a incrementar la recuperación en la Fecha 2, lo que se puede deber a los ciclos de humectación y secado (Schäffer *et al.*, 2010) en función de la estabilidad mecánica asociada a cada manejo (Seguel, 2017), aspecto que es necesario seguir estudiando. Finalmente, el Cuadro 5 presenta los resultados de capacidad de soporte para cada caso analizado.

**Cuadro 5.** Capacidad de Soporte (kPa, promedios  $\pm$ DS) para las distintas condiciones analizadas.

Fecha 1				
Tratamientos	Seco	Húmedo	$\Delta$ Seco-Húmedo	% $\Delta$ Relativo
T1 Conv. + Rastrojo	65,3 ( $\pm$ 18,4)	24,0 ( $\pm$ 3,6) b	41,3	63,2
T2 Conv. + Exceso de Rastrojo	52,6 ( $\pm$ 0,6)	21,0 ( $\pm$ 1,0) b	31,6	60,2
T3 Conv. + Rastrojo + Ác. Húmico	68,3 ( $\pm$ 25,7)	29,0 ( $\pm$ 5,0) b	39,3	57,5
T4 Cero Labranza	58,5 ( $\pm$ 5,5)	66,0 ( $\pm$ 17,0) a	-7,5	12,8
Fecha 2				
Tratamientos	Seco	Húmedo	$\Delta$ Seco-Húmedo	% $\Delta$ Relativo
T1 Conv. + Rastrojo	62,3 ( $\pm$ 25,8) b	87,5 ( $\pm$ 10,5) a	-25,1	40,3
T2 Conv. + Exceso de Rastrojo	47,6 ( $\pm$ 11,0) b	37,3 ( $\pm$ 7,7) b	10,3	21,6
T3 Conv. + Rastrojo + Ác. Húmico	64,6 ( $\pm$ 21,6) b	35,3 ( $\pm$ 5,5) b	29,3	45,3
T4 Cero Labranza	132,5 ( $\pm$ 32,5) a	32,3 ( $\pm$ 7,6) b	100,1	75,6

Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en la misma fecha y condición de humedad ( $p < 0,05$ ).

De acuerdo a Horn *et al.* (1995), suelos con predominancia de texturas medias y finas son más resistentes a las cargas mecánicas cuando poseen bajo contenido de agua, pero son altamente susceptibles a sufrir compactación severa con altos contenidos de agua. Esto quiere decir que en suelos francos arcillosos con bajo contenido de agua, la capacidad de soporte debería ser mayor (mayor resistencia a la compactación) y entretanto en condición húmeda presenta una baja capacidad de soporte (menor resistencia a la compactación).

Según los resultados presentados en el Cuadro 5, para la fecha 1 se observa que existe una mayor capacidad de soporte en seco para todos los tratamientos, excepto el T4, cumpliéndose en estos tres tratamientos (T1, T2 y T3) que el menor contenido de agua genera una mayor capacidad de soporte (Schäffer *et al.* 2010). Sin embargo, al analizar la condición húmeda para esta misma fecha, la capacidad de soporte es significativamente más alta en T4 que en el resto de los tratamientos. Para la fecha 2 en condición seca al aire, T4 presentó la mayor capacidad de soporte sobre el resto de los tratamientos, pero en húmedo la relación se invierte y es T1 el tratamiento que presenta mayor capacidad de soporte respecto al resto de los tratamientos.

Fuentes *et al.* (2013) señalan que la resistencia de un suelo está íntimamente relacionada a su distribución de tamaño de partícula y que en muestras secas es el contenido de arcilla el factor dominante. Además, como contraparte, indican que la materia orgánica tiende a disminuir la resistencia de la matriz de suelo, ya que en su proceso de descomposición favorece la agregación y la formación de macroporos, los cuales constituyen planos de falla (Seguel y Horn, 2006). Lo anterior se ajusta a lo observado en T4 en condición seca, ya que

en la fecha 1 no hay diferencias estadísticamente significativas en la capacidad de soporte y, si bien T4 tiene el mayor contenido de arcillas entre los tratamientos, es también el que presenta mayor contenido de materia orgánica. La situación es diferente en la fecha 2, ya que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, con T4 con la mayor capacidad de soporte y una disminución en su contenido de materia orgánica respecto a la fecha 1. Si bien en todos los tratamientos se evidencia una tendencia a la baja del contenido de materia orgánica, no se observa el mismo comportamiento en T1, T2 y T3, ya que poseen un menor contenido de arcilla que T4. En este sentido, la interacción entre las partículas minerales con comportamiento coloidal y la estabilización de la materia orgánica humificada en el sistema de cero labranza (T4), dependerá de cationes coadyuvantes como el  $\text{Ca}^{+2}$  (Rowley *et al.*, 2018), pero para el resto de los tratamientos, con aplicación fresca de rastrojo, se requiere un mayor tiempo para lograr la estabilización de las uniones órgano-minerales (Grosbellet *et al.*, 2011).

Si bien la condición húmeda se relaciona con una menor estabilidad mecánica, con menores valores de capacidad de soporte (Rücknagel *et al.*, 2012), los ciclos de humectación y secado favorecen una re-estructuración del suelo en función del contenido y tipo de materia orgánica, de manera tal que las uniones órgano minerales pueden explicar altas resistencias en húmedo (Stock y Downes, 2008). Al respecto, es esperable un menor diferencial entre la condición seca y húmeda mientras mayor sea la calidad estructural del suelo (Seguel, 2017), pero en el presente trabajo se dieron tendencias inversas entre las fechas, tanto para el diferencial seco-húmedo como para el diferencial relativo (Cuadro 5). En este sentido, el tratamiento T2 (aplicación de exceso de rastrojo) cumplió parcialmente su objetivo, por cuanto presentó los menores valores de capacidad de soporte, pero a la vez los menores diferenciales absolutos y relativos en la fecha 2, siendo necesario continuar estudiando los efectos de los residuos orgánicos sobre la traficabilidad del suelo.

## CONCLUSIONES

Para efectos de este ensayo y bajo las condiciones del estudio se puede concluir que:

Si bien no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, se observó una tendencia respecto a la disminución de la densidad aparente en la fecha 1 de muestreo para los tratamientos con aplicación de rastrojo en altas dosis y con aplicación de ácido húmico, sugiriendo un efecto en el corto plazo de la materia orgánica en el suelo, con el consiguiente aumento del número poroso (e).

La distribución de tamaño de poros presentó una dinámica temporal, con un incremento de los poros de drenaje lento en la segunda fecha de medición y una menor presencia de éstos en el sitio bajo cero labranza.

Los módulos de deformación indican un comportamiento similar de todos los tratamientos, para la condición húmeda. En condición seca, el tratamiento con rastrojo en altas dosis (T2) mostró la mayor sensibilidad a las cargas extremas, registrando los mayores módulos de deformación y una baja capacidad de recuperación elástica. Sin embargo, todos los tratamientos mostraron una mejora en la recuperación de las muestras una vez retirada la carga en la fecha 2, destacando el T2 en condición seca.

La capacidad de soporte está íntimamente relacionada con el contenido de arcilla y con la materia orgánica del suelo. En condición seca, para la fecha 1 no se observaron diferencias entre tratamientos, destacando la alta resistencia mecánica y la menor variabilidad seco-húmedo de la cero labranza (T4). Para la fecha 2 se observó un alto dinamismo temporal, con la mayor capacidad de soporte en seco y la mayor variabilidad seco-húmedo en T4. En este sentido, solo T1 (manejo de labranza convencional más rastrojo) logra diferenciarse del resto de los tratamientos, con la mayor capacidad de soporte en húmedo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abiven, S. S. Menasseri and C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literatura analysis. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1–12.
- Ansorge, D. and R. Godwin, 2006. High axle load – track – tyre comparison. In: Horn, R., Fleige, H., Peth, S., Peng, X. (Eds.), *Soil Management for Sustainability*. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.
- Blanco-Canqui, H., T. Shaver and I. Lindquist. 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal* 107:2449-2474.
- Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94: 38–47.
- Chaney, K. and R. S. Swift. 1986. Studies on aggregate stability: II. The effect of humic substances on the stability of reformed soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 37(2): 334–337.
- Cerda, J. 2005. Propiedades físicas de suelo bajo y fuera de la huella del tractor en dos sistemas de labranza. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 42h.
- CIREN. Chile. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N° 115. Santiago, Chile. 425 p.
- Czyz, E.A. 2004. Effect of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil & Tillage Research* 79: 153-166.
- Franzluebbers, A. 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern United States. *Soil Science Society America Journal* 74: 347 – 357.
- Fuentes, I. O. Seguel and M. Casanova. 2013. Elasto-plastic behaviour of soil aggregates and the soil matrix as a function of physical properties in three soils of central Chile. pp: 78-88. En: J. Krümmelbein, R. Horn y M Pagliai (Eds.). *Soil degradation. Advances in Geology* 42. 352p.
- Hallet, P. 2008. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency – a review. *Soil & Water Research*, 3 (Special Issue 1): S21-S29.
- Hamza, M. A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82: 121-145.
- Hartge, K. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Asuwertung, 4.vollst. Überarbeitete Auflage. Stuttgart, Germany. 178 p.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, London, UK. 383 p.
- Hakansson, I. 2005. Machinery-induced compaction of arable soils. Incidence-consequences-counter-measures. Department of soil sciences Uppsala. Reports from the Division of Soil Management N°109. Uppsala, Sweden 153 p.
- Horn, R., H.M. Taubner, M. Wuttke and T. Baumgartl. 1994. Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research*, 30: 187-216.
- Horn, R., H. Domzal, A. Slowinska-Jurkiewicz and C. van Ouwerkerk. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil & Tillage Research* 35: 23-36.

- Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 116: 77-88.
- Horn, R., K. Hartge, J. Bachmann and M. Kirkham. 2007. Mechanical stresses in soil assessed from bulk-density and penetration-resistance data sets. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1455-1459.
- Horn, R. and A. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil & Tillage Research*, 82: 5-14.
- Horn, R. and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research* 102: 201-208.
- Huang, P.M. Y, Li and M. Sumner. 2012. Handbook of Soil Sciences: Resource Management and Environmental Impacts, Second Edition. CRC Press. Boca Raton, USA. 818 p.
- Jaramillo, D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 619 p.
- Jordán, A. L. Zavala and J. Gil. 2010 Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81: 77-85.
- Julca-Otiniano, A., L. Meneses-Florián, R. Blas-Sevillano y S. Bello-Amez. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDEISA* 24: 49-51.
- Jury, W.A and R. Horton. 2004. Soil physics. New York: John Wiley & Sons 370p.
- Kayser, D.R., M. Fernandes Rodrigues, J. M. Riechert, D.J. Reinert, R. Horn, H. Fleige, et al. 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: A review, in: Krümmelbein, J, Horn, R., Pagliai, M. (Eds.), *Soil Degradation. Advances in Geoecology* 42: 282-339.
- Kézdi, A. 1980. Handbook of soil mechanics. Volume 2. Soil Testing. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, The Netherlands. 253p.
- Kutsch, W.L., M. Bahn and A. Heinemeyer. 2009. Soil carbon dynamics. An integrated methodology. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 288 p.
- Marín, E. 2011. Estabilización de camellones con cultivo de Mandarino (*Citrus reticulata*) mediante el uso de dos fuentes de materia orgánica, IV región de Chile. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo. Mención: Manejo de Suelos y Aguas. Santiago de Chile. Universidad de Chile. 34p.
- Martínez, E., J.P. Fuentes y E. Acevedo. 2008a. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal Soil Science Plant Nutrition* 8 (1): 68-91.
- Martínez, E., J.P. Fuentes, P. Silva, S. Valle and E. Acevedo. 2008b. Physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage system in a Mediterranean environment of Chile. *Soil & Tillage Research* 99: 232-244.
- Mulumba, L.N. and R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 98: 106-111.
- Osunbitan, J.A., D.J. Oyedele and K.O. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil & Tillage Research* 82: 57-64.
- Payahuala, M. y J. Dörner. 2009. Determinación de la capacidad de soporte de un Andisol (Duric Haplunad) por medio de dos métodos gráficos. *Agro Sur* 37 (3): 220-231.

- Peng, X., H.R. Horn, B. Zhang and Q. Zhao. 2004. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. *Soil & Tillage Research* 76: 125–137.
- Porta, J., M. Lopez-Acevedo y C. Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y medio ambiente. Mundi Prensa, España. 929 p.
- Reynolds, W.D. C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volumen-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263.
- Rowley, M., S. Grand and E.P. Verrecchia. 2018. Calcium-mediated stabilization of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137: 27 – 49.
- Rubio, A. M. 2010. La densidad aparente en los suelos forestales del parque natural Los Alcornocales. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola. Universidad de Sevilla. 96 p.
- Rücknagel, J., O. Christen, B. Hofmann and S. Ulrich. 2012. A simple model to estimate change in precompression stress as a function of water content on the basis of precompression stress at field capacity. *Geoderma* 177-178: 1-7.
- Sadzawka A. H. Flores, R. Grez, M.A. Carrasco, M.L. Mora, A. Neaman y R. Demanet. 2007. Métodos de análisis de lodos y de suelos. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 105 p.
- Salazar, O. C. Rojas, F. Avendaño, P. Realini, F. Nájera and Y. Tapia, 2015. Inorganic nitrogen losses from irrigated maize fields with narrow buffer strips. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 102: 359–370.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelo. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales número 5. Chillán, Chile, 80p.
- Schaetzl. R. and S. Anderson. 2005. Soils: Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press. United States of America. 833 p.
- Schäffer, B., P. Boivin and R. Schulin. 2010. Compressibility of repacked soil as affected by wetting an drying between uniaxial compression tests. *Soil Science Society of America Journal* 74 5: 1483-1492.
- Schoeneberger, P.J., D.A. Wycoski and E.C. Benham. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. United States of America.
- Seguel, O. 2017. When the capacity properties are useful. Pp: 147 – 160. In: Zimmermann, I, A. Mordehorst, H. Fleige (eds). Festschrift für Rainer Horn. Schriftenreihe Nr 111. Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel, Germany.
- Seguel, O. V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 63(3): 287-297.
- Seguel, O and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 221-232.
- Seguel, O., C. Baginsky, A. Contreras, J.I. Covarrubias, C. Gonzalez and L. Poblete. 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13 (3) 690-705.

- Sélles, G. R. Ferreyra, R. Ruiz, R. Ferreyra y R. Ahumada. 2012. Compactación de suelos y su control: Estudio de casos en el valle de Aconcagua. Boletín INIA N°234. Santiago, Chile. 53 p.
- Six J., H. Bossuyt, S. Degryze and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79 (1): 7-31.
- Sparovek, G., M.R. Lambais, A.P. Silva and C.A. Tormena. 1999. Earthworm (*Pontoscolex corethrurus*) and organic matter effects on the reclamation of an eroded Oxisol. *Pedobiologia* 43: 698–704.
- Stock, O. and N.K. Downes. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil & Tillage Research*. 99: 191-201.
- Tang, A., Y. Cui, J. Eslami and P. Défossez. 2009. Analyzing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma* 148: 282-290.
- Uribe J.M., R. Cabrera, A. De La Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago de Chile: Universidad de Chile. CORFO. 232p.
- Warrick A., 2002. Soil physics companion. CRC Press LLC, 2000 New Corporate Blvd., Boca Raton, FL 33431. 403p.
- Zhang B., R. Horn and P. Hallet. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 69 (3): 864-871.