

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL
EN FUNCIÓN DE SU CALIDAD ESTRUCTURAL**

LEONARDO SANTIAGO MIRANDA PARADA

SANTIAGO, CHILE

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL
EN FUNCIÓN DE SU CALIDAD ESTRUCTURAL**

**MECHANICAL BEHAVIOR OF A MOLLISOL IN CENTRAL CHILE
DEPENDING ON ITS STRUCTURAL QUALITY**

LEONARDO SANTIAGO MIRANDA PARADA

Santiago, Chile
2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL
EN FUNCIÓN DE SU CALIDAD ESTRUCTURAL**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo.

LEONARDO SANTIAGO MIRANDA PARADA

	Calificaciones
Profesor Guía	
Sr. Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr. Ing.	6,7
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,8
Profesores Evaluadores	
Sr. Cristian Kremer F. Ingeniero Agrónomo, Ph.D	6,8
Sra. Erika Kania K. Ingeniero Agrónomo, Dr.	5,5

Santiago, Chile
2016

AGRADECIMIENTOS

Primero partir agradeciendo a todos aquellos que hicieron posible la realización de esta memoria de título. A mi profesor guía Oscar Seguel, por la buena disposición y compromiso que siempre tuvo en el desarrollo de este trabajo. Al profesor Ian Homer, por su ayuda indispensable en el montaje de los ensayos. A Don Hugo Pérez, por compartir su conocimiento y por la ayuda dentro del laboratorio. A mis amigos Sebastián y Mahmud, por acompañarme desinteresadamente en la extenuante etapa de toma de muestras.

Finalmente agradecer a todos aquellos que me han acompañado por mi paso por la universidad. A mi familia, en especial a mis padres Miguel Ángel y Alejandra, por enseñarme el valor del trabajo y el sacrificio, por su cariño infinito y su apoyo incondicional. A mis compañeros, que con el paso del tiempo se transformaron en verdaderos amigos, les agradezco por la actitud de compañerismo que su cultivó a lo largo de la carrera, por las jornadas de estudio y por aquellas de esparcimiento, recuerdos muy felices que me acompañaran por toda la vida. Finalmente agradecer a todos los funcionarios, profesores, organizaciones (en especial a EPA) y personas que hacen que Antumapu sea un lugar especialmente acogedor.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Lugar de estudio.....	6
Materiales.....	6
Método	6
Caracterización inicial de los suelos	6
Efecto de la labranza y tránsito de la maquinaria	7
Tratamiento y diseño experimental.....	7
Evaluaciones	8
Densidad aparente.....	8
Distribución de tamaño de poros..	8
Resistencia a la penetración	8
Curva de consolidación.....	8
Análisis estadístico.....	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
Caracterización inicial de los suelos	10
Granulometría	10
Densidad real, materia orgánica y estabilidad de agregados.....	10
Efecto de la labranza y el tránsito de maquinaria	12
Densidad aparente	12
Distribución de tamaño de poros	13
Propiedades mecánicas del suelo	16
Resistencia a la penetración	16
Curva de consolidación.....	18
Máxima deformación	19
Módulos de deformación entre 20 y 50 kPa.....	20

Módulos de deformación entre 300 y 500 kPa.....	22
Módulos de recuperación	24
Capacidad de soporte	25
Resumen módulos y recuperación elástica	27
CONCLUSIONES.....	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30
APÉNDICES.....	35

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el cambio del comportamiento mecánico de un suelo manejado con sistema de labranza convencional (LC) y con pradera (P), previo y posterior a la labranza, y su efecto sobre algunas propiedades físicas. Ambos sitios utilizados son colindantes y pertenecen a la Serie Maipo (Mollisol). Los suelos fueron sometidos a labranza con arado de disco e inmediatamente transitados por un tractor hasta un número de tres pasadas sobre la misma huella. Se realizó una caracterización física básica donde se evaluó la densidad real, densidad aparente (D_b), textura, materia orgánica (MO) y estabilidad de agregados. Se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0-20 cm y 30-50 cm) en la condición inicial, posterior a la labranza y tras el primer y tercer tránsito de tractor; también se realizaron mediciones de resistencia a la penetración en estos mismos momentos. Las muestras se utilizaron para determinar la distribución de tamaño de poros y el comportamiento en la prueba de consolidación, esta última bajo dos condiciones de humedad (seca al aire y equilibrado a -60 hPa), con la cual se determinaron módulos de deformación, recuperación y capacidad de soporte. El contenido de MO en P fue de 4,3 y 2,8% (superficial y en profundidad respectivamente) mientras que para LC fue de 2,8 y 2,1%. En superficie, tras la labranza, la D_b disminuyó en P, desde 1,41 a 1,06 Mgm^{-3} , y con los posteriores tránsitos no varió, mientras que en LC la labranza provocó una disminución desde los 1,44 a 1,23 Mgm^{-3} , sin embargo, los posteriores tránsitos hicieron que el sistema se volviera a consolidar hasta los 1,42 Mgm^{-3} . En cuanto a la distribución de tamaño de poros, inicialmente ambos suelos aumentaron los poros gruesos en superficie, sin embargo, el tránsito disminuyó esta fracción en LC. La resistencia mecánica para ambos sitios fue alta, donde el mayor valor lo alcanzó LC post labranza y con tránsito (7 MPa). En la prueba de consolidación, el predominio de la fracción gruesa de poros en P determinó una mayor sensibilidad frente a las cargas y una menor capacidad de soporte, sin embargo, la recuperación fue mayor que en el sector LC. El mayor contenido MO determinó mejores características físicas en P y su respuesta frente a la labranza, por otro lado, LC tuvo una mejor respuesta en la prueba de consolidación, sin embargo, sus propiedades físicas determinan que sean un suelo de menor calidad para el establecimiento vegetal.

Palabras claves: Labranza, capacidad de soporte, tránsito de maquinaria, porosidad.

ABSTRACT

In this work was assessed the mechanical behavior of a soil managed with conventional tillage (CT) and prairie (P), both before and after tillage and, its effect on some physical properties. Both sites are adjacent and correspond to Maipo serie (Mollisol). The soils were ploughed with a disc harrow and immediately traveled by a tractor to a number of three passes in the same track. A basic physical characterization was performed, evaluating the particle density, bulk density (Db), texture, organic matter (OM) and aggregate stability. Soil samples were taken at two depths (0-20 cm and 30-50 cm) in the initial condition, after plowing and after the first and third tractor passes. Penetration resistance were also measured at this moments. The samples were used to determine the pore size distribution and the behavior in the consolidation test, the last one performed at two water contents (dry air and water tension of -60 hPa) determining deformation modulus, recovery and bearing capacity. The OM content in P site was 4,3 and 2,8% (surface and depth respectively) while for LC site was 2,8 and 2,1%. After plowing at surface, Db in P site decreased from 1,44 to 1,06 Mgm^{-3} , and subsequent transits unchanged this value, while in LC site, tillage caused a decrease from 1,44 to 1,23 Mgm^{-3} , however, subsequent transits caused consolidation, increasing Db to 1,42 Mgm^{-3} . In both soils, the coarse porosity initially increased at surface, however, this fraction decreased with the subsequent transits in LC site. The mechanical strength was high in both sites, the highest value was reached in LC post tillage and traffic (7 MPa). The predominance of coarse porosity in P site, determined greater sensitivity to loads and lower bearing capacity, however, the recovery was higher than in LC site. The highest OM content determined better physical features in P site and its response to tillage, moreover, LC site had a better response in the consolidation test, but its physical properties determine a low quality soil for crop production.

Key words: Tillage, bearing capacity, machinery traffic, porosity.

INTRODUCCIÓN

La labranza consiste comúnmente en la inversión y mullimiento de la capa superficial del suelo a través de araduras y rastrajes que, cuando se operan con una humedad adecuada del suelo, resultan en una disgregación y mullimiento, mejorando las propiedades mecánicas para su posterior intervención (siembra u otro) (Acevedo y Martínez, 2003). Durante un corto periodo de tiempo, la labranza disminuye la densidad aparente y la resistencia a la penetración y aumenta la macroporosidad del suelo (Logsdon *et al.*, 1999; Osunbitan *et al.*, 2005). Sin embargo, la labranza intensiva o bajo condiciones inadecuadas de humedad destruye la estructura del suelo, interrumpe la continuidad de los poros, reduce la cantidad de residuos presentes en la superficie del suelo y degrada la calidad de éste (Franzluebbers, 2002; Lal y Shukla, 2004). La labranza afecta directamente la agregación del suelo por medio de una perturbación física de los macroagregados (Barto *et al.*, 2010). Lo anterior tiene como efecto que la materia orgánica del suelo (MOS) tiende a disminuir cuando los ecosistemas nativos son convertidos a sistemas de cultivo, ya que la capa superior del suelo, al estar sujeta a labranza, conduce a la ruptura de los macroagregados y a la oxidación de la materia orgánica (Franzluebbers, 2002). Esta pérdida de MOS disminuye la disponibilidad de nutrientes y también afecta perjudicialmente las propiedades físicas del suelo (Zotarelli *et al.*, 2007).

Una opción para disminuir los efectos negativos de los sistemas intensivos de labranza son las rotaciones con pasturas. Al incluir pasturas en la rotación de cultivos de un suelo en Uruguay, se obtuvo un aumento significativo de un 23% en el nivel de carbono orgánico del suelo (COS), comparado con un sistema intensivo, ambos bajo labranza tradicional (Salvo *et al.*, 2010). En otro estudio realizado en Uruguay, tras 12 años de rotaciones con pasturas, se obtuvo un 58% más de estabilidad de agregados al agua que sistemas intensivos de cultivos, ambos bajo labranza tradicional (Ernst y Siri-Prieto, 2009). El aumento de la estabilidad de los agregados durante la fase de pastura se debe a dos razones principalmente: (i) la ausencia de labranza, que favorece la estabilización de la MOS y (ii) el sistema fibroso y denso de las raíces de especies perennes, que genera uniones entre las partículas sólidas por amarre y por efecto cementante de los exudados (Haynes *et al.*, 1991).

La labranza, en particular, destruye las uniones entre partículas sólidas, disminuyendo la cohesión y la capacidad de soporte del suelo (Ellies *et al.*, 1993). La zona de tránsito posterior a la labranza acerca las partículas entre sí, aumentando los puntos de contacto, lo que contribuye a recuperar la estabilidad mecánica (Ellies y Dörner, 1999; Horn, 2003). Esta mayor resistencia mecánica del suelo se produce a expensas de una disminución del sistema poroso, de manera que para que el sistema poroso no se modifique, la presión que ejerce la maquinaria debe ser inferior a la capacidad de soporte del suelo (Ellies, 1999; Schäffer *et al.*, 2010). Este comportamiento se observa en la Figura 1, que relaciona la deformación del suelo (medida como un asentamiento) en función de la carga normal (tensión vertical en kPa) equivalente a la presión propia de las partículas del suelo y de las

cargas externas (Kézdi, 1980). En ella existe un rango de deformación elástica, en el cual el suelo recupera su porosidad una vez eliminada la carga externa, pero una vez que se supera el valor de preconsolidación, más conocido como capacidad de soporte, se genera una deformación de naturaleza plástica, con pérdida permanente de porosidad (Payahuala y Dörner, 2009).

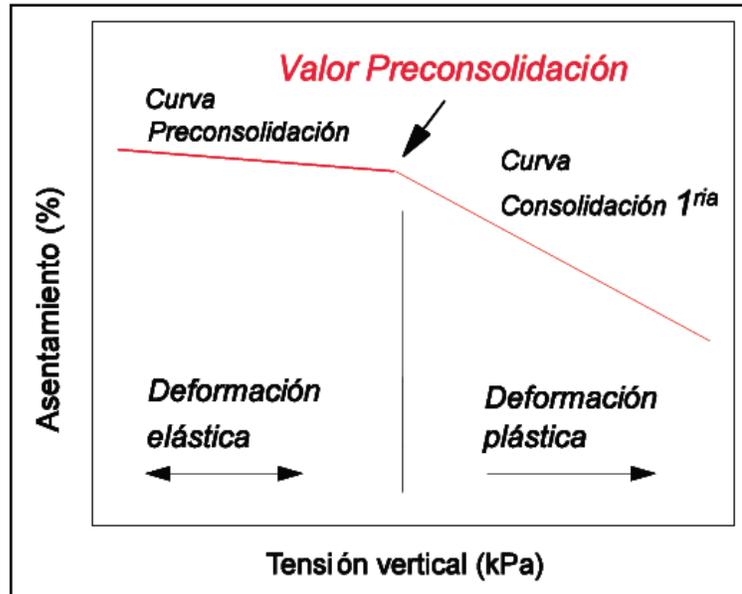


Figura 1. Representación esquemática de la capacidad de soporte del suelo (o valor de preconsolidación). Tomado de Payahuala y Dörner (2009).

El efecto de la materia orgánica sobre las propiedades mecánicas del suelo apuntaría a aumentar su elasticidad y capacidad de soporte, previniendo la compactación, tal como lo demostró Zhang *et al.* (2005), quien al agregar dosis crecientes de materiales orgánicos a dos suelos de textura contrastante, comprobó un aumento en la cohesión de las partículas, la capacidad de soporte y la recuperación elástica, esta última catalogada como un índice de resiliencia del suelo.

La frecuencia de tránsito sobre un mismo punto representa otro factor importante en el comportamiento mecánico de un suelo. Posterior a la labranza, la primera pasada de un tractor tiene un efecto en profundidad mucho mayor que las siguientes, las cuales distribuyen sus tensiones en forma más superficial (Ellies y Dörner, 1999). Esta menor penetración de las tensiones en profundidad se debe a la compactación que se genera secuencialmente con cada pasada; debido a esto, el suelo resiste a las nuevas deformaciones. Sin embargo, este aumento en la resistencia debido al incremento en la frecuencia del tráfico, es menor mientras más alto es el contenido de agua (Ellies y Dörner, 1999).

Diversos estudios se han realizado respecto al efecto del uso del suelo, los sistemas de labranza y las rotaciones de cultivos sobre sus propiedades físicas (Haynes *et al.*, 1991;

Haynes y Beare, 1997; Dexter *et al.*, 2004; Osunbitan *et al.*, 2005; Glab y Kulig, 2008). A nivel de propiedades mecánicas, se ha estudiado la reología de los procesos de compactación asociados a las características de la maquinaria (Schjonning *et al.*, 2006; Arvidsson y Keller 2007) y los sistemas de labranza (Levy y Mamedov, 2013), sin embargo existen pocos antecedentes que relacionen el comportamiento mecánico del suelo y su efecto sobre las propiedades físicas al ser labrado y transitado, tomando como referencia un sitio poco intervenido (Dörner *et al.*, 2013).

Objetivo general

Evaluar el cambio del comportamiento mecánico de un suelo manejado con sistema intensivo de labranza y con pradera posterior a la labranza y su efecto sobre algunas propiedades físicas.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

El ensayo se realizó en dos sitios colindantes ubicados en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°33'58" latitud sur, 70°38'09" longitud O), Comuna de La Pintana, Santiago de Chile, durante diciembre de 2014 a marzo de 2015. Uno de los sitios fue manejado con labranza intensiva (LC), y el otro correspondió a una pradera natural (P) dominada por *Cynodon dactylon* y *Brassica* sp., la cual no se ha intervenido en más de 5 años.

Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

El suelo corresponde a la Serie Maipo, la cual es miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica, de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol) (CIREN, 1996). El clima es Mediterráneo, con temperatura máxima promedio en el mes más cálido (enero) de 26,2°C, temperatura mínima en el mes más frío (julio) de 4,3°C, precipitación promedio anual de 308,4 mm y evapotranspiración promedio anual de 992,2 mm (Uribe *et al.*, 2012).

Materiales

Para medir la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro digital (Penetrologger, Eijkelkamp, Holanda). Para las mediciones de retención de agua y distribución de tamaño poro se utilizó una cama de arena (Sandbox, Eijkelkamp, Holanda), ollas a presión y platos a presión (Soilmoisture Equipment Corp, USA). La prueba de consolidación se realizó con un odómetro de presión (Fabricación propia). Para la preparación de suelo se utilizó un tractor Ford 6600, arado disco y rastra tipo offset. Para la aplicación de los tratamientos se utilizó un tractor Massey Ferguson 240(4x2) de 46 HP, 1,71 Mg y neumático trasero 14,9x24. Para la extracción de las muestras para la prueba de consolidación se usaron cilindros de 10 cm de diámetro y 3 cm de altura, mientras que para las otras evaluaciones se usaron cilindros de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura.

Método

Caracterización inicial de los suelos

Se realizó una caracterización de los sitios, tomando muestras en cuadruplicado entre 0-20

cm y 30-50 cm, de manera de considerar el horizonte Ap (afectado por la labranza) y el horizonte subsuperficial no labrado. Se evaluó la granulometría (textura) por el método del hidrómetro de Bouyoucos y densidad real por el método del picnómetro, ambos descritos en Sandoval *et al.* (2012), además se midió la materia orgánica por calcinación según método descrito en Sadzawka *et al.* (2006). Finalmente se evaluó la estabilidad de macroagregados y microagregados (Hartge y Horn, 2009), evaluados en base a la variación del diámetro medio de los agregados (VDMA) y la relación de dispersión (RD) respectivamente.

Efecto de la labranza y tránsito de la maquinaria

La tercera semana de enero de 2015, con los suelos en estado friable (3 días posterior un riego) se preparó el suelo de ambos sitios y se pasó un arado de disco y rastra tipo offset (labranza para ambos sitios). Posteriormente se hizo transitar en ambos sitios un tractor sin implementos tres veces por el mismo lugar (por la misma huella). El tractor posee una masa de 1,71 Mg, y en todos los casos se transitó a una velocidad de 7 km h⁻¹. Se consideró una presión ejercida en la zona de contacto suelo-neumático similar a la presión de inflado (Grupta y Raper, 1994), la cual fue de 89 kPa.

Tratamiento y diseño experimental

En cada sitio de estudio se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con 4 tratamientos y 4 repeticiones por tratamiento siendo la unidad experimental una superficie de 1 m² (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos del ensayo.

Tratamiento	Nº pasadas de tractor
T1	Previo a la labranza
T2	0
T3	1
T4	3

El tratamiento 1 correspondió a la condición o momento previo al arado de disco y rastra (llamado previo a la labranza). El tratamiento 2 correspondió al momento o muestreo posterior a la labranza denominado “0 pasadas del tractor”. El tratamiento 3 correspondió al momento o muestreo después de la primera pasada de tractor (en la zona de tránsito de las ruedas). El tratamiento 4 correspondió al momento o muestreo posterior a la tercera pasada de tractor (en la zona de tránsito de las ruedas).

Evaluaciones

Todas las propiedades, menos la resistencia mecánica, se evaluaron a 2 rangos de profundidad distintas: 0 – 20 y 30 – 50 cm, de manera de incluir la zona labrada e inmediatamente bajo ella.

Densidad aparente. Se evaluó la densidad aparente por el método del cilindro descrito en Sandoval *et al.* (2012).

Distribución de tamaño de poros. Para determinar la distribución de tamaño de poros se realizaron curvas de retención de agua. Primero se dejaron las muestras en una bandeja con un nivel de agua que las hidrató y estabilizó a -0,2 kPa; luego pasaron a cama de arena para ser estabilizadas a -6 kPa y posteriormente a olla de presión a -33 kPa. Cabe mencionar que luego de cada proceso de estabilización, se pesó la muestra para determinar las respectivas pérdidas de agua. Finalmente la muestra se llevó a estufa por un día y se volvió a pesar; con la masa del suelo seco se calculó la densidad aparente (D_a) y por diferencia de masa se calcularon los contenidos de agua volumétrica a cada tensión. Para poder completar la curva característica, se estabilizaron nuevas muestras, esta vez disturbadas, a una presión de -1500 kPa en el plato de presión, transformando los contenidos de agua gravimétrica (P_w) en volumétricos (P_v) mediante la relación $P_v = P_w * D_a$. Se clasificaron los poros de acuerdo a Hartge y Horn (2009): con el diferencial de los equilibrios mátricos entre 0,2 y -6 kPa se obtuvieron los poros de drenaje rápido (PDR), mientras que entre los -6 y -33 kPa se determinaron los poros de drenaje lento (PDL). Por otro lado, el volumen de agua retenida entre -33 y -1500 kPa determinó los poros de agua útil (PAU) y finalmente con el contenido de agua retenido a -1500 kPa se obtuvo el volumen de poros de agua inútil (PAI).

Resistencia a la penetración. La resistencia a la penetración se midió cada 5 cm hasta una profundidad de 50 cm.

Curva de consolidación. Para la prueba de consolidación se duplicó el número de muestras por tratamiento ya que ésta se realizó bajo dos contenidos de humedad distintos, seco al aire libre (secadas al aire libre por una semana) y equilibrada a -60 hPa (la muestra se dejó en una bandeja con un nivel de agua que permitió equilibrarlas a -2 hPa, al día siguiente fueron pesadas y puestas en la cama de arena para finalmente ser equilibradas a -60 hPa). Una vez equilibradas las muestras, pasaron por la prueba de consolidación, la cual se realizó sobre las muestras confinadas (cilindro metálico) y con drenaje libre (Juárez y Rico, 2005). Para esto, la muestra fue puesta entre dos placas metálicas porosas y se le aplicó una carga mediante un pistón activado por 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), dejando un tiempo de asentamiento de 3 minutos para las muestras secas al aire libre y 5 minutos para las muestras equilibradas a -

60 hPa, de manera de asegurar que éstas alcancen su máxima compresión, la cual fue medida con un comparador micrométrico. Luego, en intervalos de presión de 100, 20 y 0 kPa, se descargó la muestra para registrar la capacidad de recuperación del suelo. Terminada la prueba de consolidación, la muestra se pesó y se llevó a estufa a 105°C para volver a ser pesada al día siguiente.

Se registró la máxima deformación (mm), que corresponde al asentamiento a los 500 kPa. También se calcularon tres módulos de consolidación, que corresponden a la pendiente generada en tres tramos de la curva de consolidación: 20 a 50 kPa, 300 a 500 kPa y la recuperación total que va desde los 500 a los 0 kPa. Finalmente se calculó la capacidad de soporte con el método gráfico de Pacheco Silva, descrito en Payahuala y Dörner (2009).

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA) con un 5% de nivel de significancia. En caso de detectar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos se utilizó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey. Para comparar diferencias de las propiedades entre sitios se utilizó una prueba t.

Con el propósito de caracterizar los factores de manejo (LC y P) y profundidad (0-20 y 30-50) en cada contenido de agua (independiente del n° de pasadas) se cruzaron los siguientes tratamientos: T1 (LC 0-20), T2 (LC 30-50), T3 (P 0-20) y T4 (P 30-50). Los cuales se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA) con un 5% de nivel de significancia. En caso de detectar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos se utilizó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial de los suelos

Granulometría

El Cuadro 2 presenta la distribución de tamaño de partículas para los dos sitios de estudio. Ambos suelos pertenecen a la Serie Maipo, sin embargo, existen ligeras diferencias entre ellos, principalmente en la fracción más fina.

Cuadro 2. Porcentaje de partículas primarias y clase textural de los sitios de estudio.

Sitio	Profundidad (cm)	A (%)	L (%)	a (%)	Clase textural
Labranza convencional	0-20	26,0	37,6	36,4	F
	30-50	22,3	33,6	44,1	F
Pradera	0-20	32,3	36,2	31,5	FA
	30-50	34,5	34,1	31,4	FA

A: arcilla; L: limo; a: arena.

Es sabido que la labranza deja el suelo mucho más expuesto a la erosión que un sistema poco intervenido, el cual mantiene una cubierta vegetal por periodos de tiempo mayores que sitios labrados (Ernst y Siri-Prieto, 2009). Debido a lo anterior, los riegos ocasionan un mayor transporte de material en un sistema de cultivo que en una pradera. Generalmente, las partículas que más se ven afectadas por este tipo de erosión son las del tamaño limo; sin embargo, en un sistema de labranza convencional, donde la MO no alcanza a permanecer en el sistema el tiempo necesario para integrarse en el ciclo de formación de agregados, deja a las partículas tamaño arcilla mucho más vulnerables al transporte (Six *et al.*, 2004), como posiblemente ocurre en esta situación. Aún así, en el horizonte Ap (0-20 cm) las diferencias entre sitios no son relevantes, y ambas se encuentran cercanas al límite de las clases texturales F y FA.

Densidad real, materia orgánica y estabilidad de agregados

En el Cuadro 3 se presentan los valores de densidad real (D_r), materia orgánica (MO) y estabilidad de macroagregados y microagregados, evaluados en base a la variación del diámetro medio de los agregados (VDMA) y la relación de dispersión (RD) respectivamente. Estos dos últimos casos corresponden a pruebas de dispersión, por lo que el menor valor denota la mayor estabilidad.

Cuadro 3. Valores promedio de densidad real, materia orgánica, y estabilidad de agregados.

Sitio	Profundidad (cm)	Dr (Mg m⁻³)	MO (%)	VDMA (mm)	RD (%)
Labranza convencional	0-20	2,74	2,89	5,34	65,5
	30-50	2,74	2,14	3,95	44,8
Pradera	0-20	2,64	4,32	0,42	51,1
	30-50	2,66	2,84	3,15	69,8

En cuanto a la densidad real, los valores son los esperados para suelos minerales, con niveles ligeramente menores en el sitio de pradera debido al mayor contenido de MO (Sandoval *et al.*, 2012).

Los resultados de MO son lógicos según la condición de uso del sitio y profundidad, con valores mayores en el sitio de pradera entre los 0-20cm debido a los mayores aportes de MO superficial producto del desarrollo de la pradera. Por otro lado, resulta interesante calcular el índice de estratificación de la MO, propuesto por Franzluebbbers (2002) y que corresponde al cociente entre los contenidos de MO superficial y en profundidad. En este caso, los valores de este índice son 1,35 y 1,52 para el sitio de labranza convencional y pradera respectivamente, situando al suelo del sitio de pradera con una mayor calidad. En los casos presentados por Franzluebbbers (2002), los suelos bajo labranza convencional presentaron índices menores a 2, por lo que los valores obtenidos son esperables si se considera que el sitio de pradera alguna vez fue intervenido agrícolamente.

El principal efecto de la MO en las propiedades físicas del suelo es la agregación de las partículas, existiendo una relación directa y creciente entre la estabilidad de los agregados y el contenido de carbono orgánico (Martínez *et al.*, 2008). A su vez, los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción orgánica altamente humificada, con período de residencia en el suelo mayor a siete años (Buyanovsky *et al.*, 1994). Six *et al.* (2004) propusieron un modelo del ciclo de formación y destrucción de los agregados, donde los procesos representados en el modelo son el resultado de una interrelación entre macroagregados, el ciclo de la MO y factores de control como la perturbación por labranza, la cual genera una disminución del tamaño de los agregados con pérdida de MO. Por el contrario, el aumento de la cantidad de macroagregados repercute positivamente en otras propiedades físicas del suelo, disminuyendo la densidad aparente y por lo tanto aumentando la porosidad del suelo y la retención de agua, además de disminuir la resistencia a la penetración y aumentar la tasa de infiltración de agua en el suelo (Martínez *et al.*, 2008).

Con respecto a la estabilidad de los macroagregados, en el suelo bajo labranza convencional se ha producido una pérdida de MO respecto al sitio bajo pradera, la que se reflejó en una alta VDMA en el horizonte superficial del sitio de labranza convencional. Si bien se espera que exista una relación inversa entre MO y VDMA en el caso del sitio de cultivo, es posible que el corto tiempo de permanencia de la MO en la capa superficial no permita que ésta cumpla su función de agente agregante (Chenu y Plante, 2006). Por su

parte, la MO medida en profundidad correspondería a un material más humificado, lo que en el sitio de labranza convencional genera un menor valor de VDMA (mayor estabilidad).

En cuanto a la estabilidad de microagregados, el sitio con pradera posee una mayor estabilidad (menor dispersión) en superficie que aquel manejado con cultivo. Esto era esperable debido al mayor contenido de materia orgánica, aportado principalmente por el sistema fibroso de raíces y exudados que se produce bajo esta condición. Pese a lo anterior, en profundidad el comportamiento es totalmente inverso entre sistemas de labranza, aunque sigue la misma tendencia que su respectivo VDMA. Esto indicaría que para ambos tipos de agregados (macro y micro), la labranza generaría un efecto de protección de la MO en profundidad, favoreciendo una mayor estabilidad, pero en el caso de la pradera, el efecto dependería de la actividad del sistema de raíces, generándose la mayor estabilidad en superficie, tal como lo demostró Seguel *et al.* (2011) al utilizar una rotación de cultivos de cobertura en un parronal de uva de mesa, donde el riego genera un crecimiento superficial de las raíces del cultivo, sin una suficiente exploración en profundidad.

Efecto de la labranza y el tránsito de maquinaria

Densidad aparente

El Cuadro 4 presenta los valores de densidad aparente (D_a), donde se observó que, inmediatamente después de realizada la labranza, las partículas quedan sueltas en superficie, disminuyendo la D_a .

Cuadro 4. Promedios (\pm DE) de densidad aparente para cada tratamiento, sitio y profundidad.

N° Pasadas	Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$)	
	LC	P
	Superficie (0-20 cm)	
Previa	1,44 (\pm 0,16) a	1,41 (\pm 0,05) a
0	1,23 (\pm 0,07) b	1,06 (\pm 0,05) b*
1	1,38 (\pm 0,05) ab	1,12 (\pm 0,19) b*
3	1,42 (\pm 0,05) ab	1,06 (\pm 0,03) b*
	Profundidad (30-50 cm)	
Previa	1,45 (\pm 0,13) a	1,37 (\pm 0,02) a
0	1,47 (\pm 0,06) a	1,44 (\pm 0,08) a
1	1,43 (\pm 0,06) a	1,41 (\pm 0,04) a
3	1,52 (\pm 0,11) a	1,42 (\pm 0,08) a

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (p value $<$ 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

El valor de D_a de las muestras superficiales en la condición previa a la labranza en ambos sitios es levemente menor a la indicada por CIREN (1996) para la Serie Maipo ($1,50 \text{ Mg m}^{-3}$).

Al analizar los valores obtenidos para LC, se observó que la evolución de la D_a acorde a los tratamientos fue la esperable. La labranza disturba el sistema, separa los macroagregados y suelta los microagregados, aumentando el porcentaje de poros y por ende disminuyendo la D_a . Posteriormente, el tránsito de la maquinaria sobre el suelo preparado, acerca las partículas y las comprime, disminuyendo parte del espacio poroso ganado con la labranza (Alleto y Coquet, 2009). Finalmente, la tercera pasada tiende a acercar aún más las partículas, llegando a un punto de estabilidad para la carga aplicada, tal como lo demostraron Usowicz y Lipiec (2009) en un suelo franco limoso en Polonia, donde la D_a mostró la misma dinámica en respuesta al tránsito de maquinaria.

En el caso de P, se puede apreciar que el efecto disturbador de la labranza disminuyó de manera más considerable la D_a superficial que en LC, existiendo diferencias significativas entre los sitios. Lo anterior se puede deber a la mejor calidad estructural del sitio menos disturbado (P), ya que de acuerdo a Franzluebbbers (2002), la estratificación de la MO permite conservar la integridad de los agregados incluso posterior a la labranza, lo que potencia la formación de espacios interagregados estables.

En las muestras superficiales, el tránsito del tractor no generó diferencias estadísticamente significativas dentro de cada sitio en relación a la condición inmediatamente después de la labranza (cero pasadas), sin embargo, resulta interesante recalcar la estabilidad de los valores de D_a en el sitio P posterior a la labranza, los cuales se mantuvieron bajos incluso con 3 pasadas de tractor. Esto se puede deber a la mayor estabilidad de los agregados del sitio P (Cuadro 3), los cuales se conservan de manera más íntegra posterior a la labranza, reduciendo la magnitud del cambio, el que pasaría a ser explicado sólo por la modificación del espacio inter-agregados.

En el caso de la D_a en profundidad, si bien no hubo diferencias significativas entre tratamientos, existe una tendencia al aumento en relación a la condición previa a la labranza, lo que se puede deber a la transmisión en profundidad de la presión ejercida por el implemento de labranza (Jorajuría, 2005). Al evaluar el efecto de 16 pasadas de tractor, Ellies y Dörner (1999) determinaron que con cada pasada el suelo se compacta superficialmente y, debido a ello, disminuye la profundidad de penetración de las tensiones y por ende su efecto sobre la D_a en profundidad es marginal.

Distribución de tamaño de poros

Para determinar la distribución de tamaño de poros se realizaron curvas de retención de agua, las que se generaron al someter muestras a distintas tensiones. Los resultados se presentan los Cuadros 5 y 6 para macroporos y para meso y microporos respectivamente.

Cuadro 5. Promedios (\pm DE) de porcentaje de poros de drenaje rápido (PDR) y lento (PDL), para cada tratamiento, sitio y profundidad.

N° Pasadas	PDR (%)		PDL (%)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	5,0 (\pm 2,3) ab	3,5 (\pm 1,0) a	10,6 (\pm 1,7) a	14,1 (\pm 4,9) a
0	7,4 (\pm 1,1) a	8,3 (\pm 2,5) ab	19,1 (\pm 2,2) b	18,5 (\pm 2,4) a
1	3,7 (\pm 0,5) b	7,8 (\pm 1,8) ab*	19,5 (\pm 1,2) b	19,3 (\pm 2,0) a
3	3,8 (\pm 0,4) b	9,3 (\pm 3,7) b*	16,8 (\pm 0,8) b	17,8 (\pm 0,7) a
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	8,9 (\pm 0,8) a	7,0 (\pm 0,9) a*	12,6 (\pm 2,1) a	16,3 (\pm 3,1) a
0	5,2 (\pm 1,0) b	8,0 (\pm 3,1) a	12,6 (\pm 1,5) a	12,1 (\pm 1,2) b
1	5,1 (\pm 1,0) b	8,8 (\pm 1,3) a*	13,1 (\pm 1,8) a	13,0 (\pm 0,8) ab
3	5,0 (\pm 2,3) b	7,4 (\pm 2,1) a	11,1 (\pm 1,6) a	13,0 (\pm 1,5) ab

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

Cuadro 6. Promedios (\pm DE) de porcentaje de poros de agua útil (PAU) e inútil (PAI), para cada tratamiento, sitio y profundidad.

N° Pasadas	PAU (%)		PAI (%)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	17,2 (\pm 2,7) a	14,6 (\pm 4,9) a	10,7 (\pm 1,3) a	16,3 (\pm 1,5) a*
0	14,0 (\pm 1,8) a	18,1 (\pm 2,4) a	8,1 (\pm 0,5) b	11,3 (\pm 2,8) a
1	13,4 (\pm 1,6) a	20,2 (\pm 13,3) a	9,5 (\pm 0,5) ab	14,9 (\pm 5,0) a
3	15,5 (\pm 1,1) a	17,5 (\pm 3,7) a	10,5 (\pm 0,3) a	15,7 (\pm 1,2) a*
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	9,5 (\pm 1,2) a	12,2 (\pm 1,1) a*	8,9 (\pm 1,1) a	10,9 (\pm 1,5) a
0	14,2 (\pm 1,7) b	11,0 (\pm 0,9) a*	9,3 (\pm 0,9) a	16,0 (\pm 0,9) b*
1	14,2 (\pm 1,9) b	11,6 (\pm 2,1) a	9,4 (\pm 2,1) a	16,8 (\pm 1,6) b*
3	13,7 (\pm 0,7) b	10,1 (\pm 2,6) a*	11,2 (\pm 2,6) b	17,6 (\pm 1,9) b*

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

Efecto en superficie (0 – 20 cm). La labranza interviene el suelo disgregándolo en agregados, lo que genera un aumento del espacio entre éstos. En el Cuadro 5 es posible ver este efecto, donde en superficie y tras la labranza (0 pasadas de tractor), ambos suelos aumentaron el porcentaje de macroporos, referidos a poros de drenaje rápido (PDR, $>50\mu\text{m}$) y poros de drenaje lento (PDL, $10\text{-}50\mu\text{m}$), aunque sólo con diferencias estadísticamente significativas en el sitio LC para los PDL. Este aumento de la macroporosidad es una de las finalidades de la labranza; sin embargo, tras esta existen distintas labores que implican el tránsito de maquinaria sobre suelo recién preparado, lo que representa una amenaza a la integridad de estos macroporos.

Horn y Fleige (2009) plantean un mínimo de 8% de PDR para asegurar la adecuada funcionalidad física del suelo. En este sentido, el sitio P, tras ser transitado, es capaz de mantener una proporción adecuada de PDR, no así el sitio LC, que con el tránsito disminuye de manera considerable sus PDR. Por otro lado, el bajo porcentaje inicial de PDR en el suelo del sitio P, se debe a que estos poros son rellenados parcialmente con MO, lo que sucede comúnmente en suelos con aportes continuos de MO y alta actividad biológica (Kay y Angers, 2002; Seguel y Horn, 2006a).

Al transitar una vez sobre el suelo recién preparado, es posible observar que en LC se conservan los PDL pero disminuyen de manera significativa los PDR, mientras que P conserva los PDR y PDL ganados por la labranza, mostrando una alta estabilidad mecánica incluso tras transitar tres veces sobre la misma huella. Es importante recalcar que el tránsito sobre el suelo recién preparado genera diferencias significativas entre los sitios de LC y P en el porcentaje de PDR. Esta diferencia se debe básicamente a la estabilidad de los agregados que se forman en cada sitio que, como se puede ver en el Cuadro 3, es mayor en el sitio P (menores índices de dispersión en relación a LC) como consecuencia de la protección física de la materia orgánica (Mulumba y Lal, 2008). Así, un manejo que genera la acumulación de materia orgánica, promueve una friabilización del volumen suelo, con agregados más densos y estables desde el punto de vista físico y mecánico, lo que le permite mantener un sistema macroporoso por más tiempo (Hillel, 1998; Chenu y Plante, 2006).

En cuanto a los poros de agua útil (PAU, $0,2\text{-}10\mu\text{m}$) no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, pero es posible ver cierta tendencia a la disminución en LC y al aumento en P posterior a la labranza, lo que debe estar relacionado principalmente al re-acomodo de microagregados en LC como consecuencia de su baja estabilidad física mecánica (Seguel y Horn, 2006b) y a la soltura de cargas normales en P (Schäffer *et al.*, 2007). Por otro lado, los poros de agua inútil (PAI, $<0,2\mu\text{m}$) disminuyeron después de la labranza por efecto de la soltura de la tensión normal propia del peso del suelo (Horn *et al.*, 2007) y aumentaron acorde a las pasadas de tractor, llegando finalmente a valores cercanos a la condición inicial y mostrando diferencias significativas entre los sectores, donde P presenta una mayor microporosidad acorde al mayor contenido de arcilla (Warrick, 2002).

Efecto en profundidad (30 – 50 cm). Se pudo observar que la transmisión de la presión en profundidad (30-50 cm) afecta de manera diferente a los macroporos, dependiendo del sitio. Es así como en LC se produce una disminución significativa de PDR, mientras que en P disminuyen de manera significativa los PDL. En ambos casos el tránsito de la maquinaria al momento de realizar la labranza es el factor que explica el proceso de compresión de estos poros (Jorajuría, 2005), ya que los posteriores tránsitos no tienen mayor efecto. La condición previa a la labranza responde a la condición final de la temporada anterior, con *n* ciclos de humedecimiento y secado que han contribuido a generar estructura (Sommel *et al.*, 1992). El paso de la maquinaria con el implemento de labranza genera una reacción en profundidad que difiere según el uso previo, donde la condición más crítica la evidencia el sitio LC, que disminuye su porosidad gruesa (PDR, >50 μm) por debajo del 8%, señalado por Horn y Fleige (2009) como adecuado para el intercambio gaseoso.

La destrucción de los PDR en LC (30-50 cm) permite el aumento significativo de los PAU, llegando ambos casos (LC y P) a niveles adecuados según Reynolds *et al.* (2009), en tanto el mayor contenido de arcilla favorece la densificación en profundidad en el sitio P (Horn *et al.*, 1994), con un incremento de los PAI. Finalmente, tras la tercera pasada de tractor se generan diferencias significativas entre LC y P tanto para los PAU como para los PAI.

Propiedades mecánicas del suelo

Resistencia a la penetración

En la Figura 2 se muestran las gráficas correspondientes a la resistencia a la penetración de ambos sitios y para todos los tratamientos. El detalle de los resultados se presenta en el Apéndice 1.

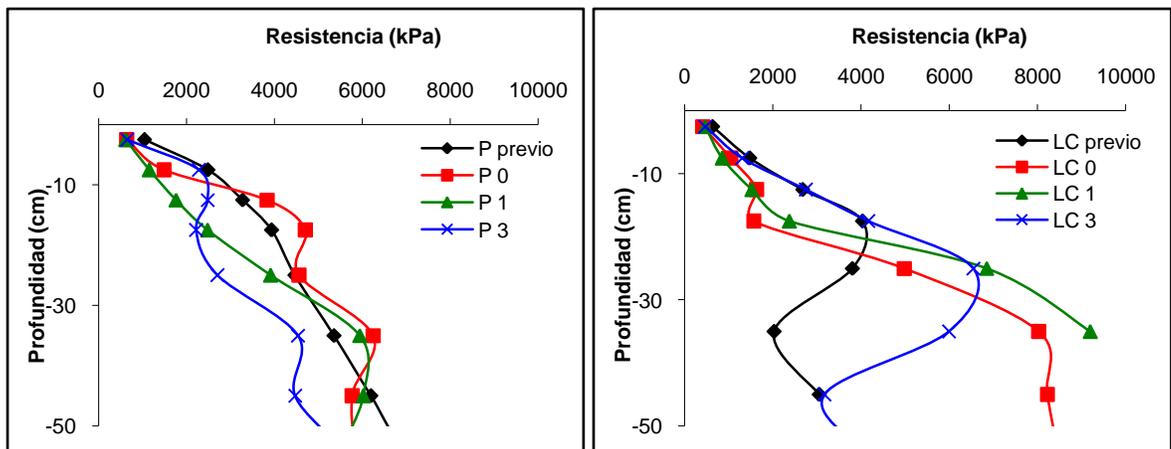


Figura 2. Resistencia a la penetración para el sitio con labranza convencional (izquierda) y pradera (derecha).

Al comparar los sitios se puede ver que en la condición inicial ambos son muy parecidos,

mostrando diferencias pasado los 15 cm de profundidad aproximadamente, donde la resistencia en el sitio P sigue aumentando, mientras que en el sitio LC disminuye, acusando la existencia de un pie de arado entre 20-25 cm. El aumento lineal de la resistencia en el sitio poco intervenido (P) se explica por la ausencia de fuerzas que afectan la consolidación natural de la pedogénesis, tal como lo demostró Bachmann *et al.* (2006) en praderas sobre suelos derivados de cenizas volcánicas.

Tras la labranza, la resistencia en el sitio P parece no verse afectada, mientras que en el sitio LC tiene una disminución hasta los 20 cm aproximadamente (zona de labranza) y un aumento fuerte en profundidad, aunque esto último correspondería a una distribución irregular del contenido de agua post-labranza, lo que genera cambios en la resistencia mecánica (Vaz *et al.*, 2011). Las raíces abundantes en P disminuyeron el efecto disturbador en profundidad de la aradura, permitiendo conservar macrounidades de suelo que mantuvieron la resistencia inicial; así, con el primer tránsito en el sitio P se disminuye la resistencia por destrucción de estas macrounidades (Six *et al.*, 2004), mientras que en el sitio LC no se genera una gran diferencia con la condición anterior. Finalmente, tras la tercera pasada de tractor, en el sitio P aumenta la resistencia en los primeros 15 cm, alcanzando valores parecidos a la condición inicial; sin embargo en profundidad la resistencia es notablemente menor comparado con la condición inicial. Por otro lado, en el sitio LC aumenta la resistencia y se alcanza en los primeros 15 cm valores similares a la condición inicial, con una resistencia que aumenta en profundidad de manera considerable en comparación con la condición inicial.

Al aplicar una carga mecánica sobre el suelo, se produce una alteración del volumen de éste, principalmente producto de la pérdida de poros ocupados por aire, aumentando la proporción de agua, lo que modifica la estabilidad de la matriz suelo (Mordhorst *et al.*, 2012). Dependiendo de la magnitud de la carga y de la continuidad del sistema poroso, el agua puede actuar entregando estabilidad, en caso que se mantenga bajo tensión, o disminuyendo la estabilidad, al actuar como un agente lubricante, lo que modifica la resistencia mecánica (Seguel y Horn, 2006b). Esto es lo que posiblemente ocurre tras la tercera pasada en ambos sectores en profundidad, donde la transmisión de la cargas altera la proporción de agua, lo que produce el colapso de los agregados y por ende la disminución de la resistencia (Mitchell, 1993).

Taylor y Brar (1991) señalan que el valor crítico de resistencia sobre el cual se reduce notablemente la elongación radical es de 2 MPa, en tanto Schoeneberger *et al.* (2012) señalan valores mayores a 4 MPa como muy altos y mayores a 8 MPa como extremadamente altos. Por otro lado, Sene *et al.* (1985) encontraron una relación entre la textura y la resistencia, determinando un valor crítico para la elongación de raíces de entre 6 y 7 MPa para texturas arenosas y 2,5 MPa para las arcillosas. Tomando en cuenta lo anterior, ambos suelos en general ofrecen resistencias altas para el crecimiento de las raíces, destacando el sector de cultivo post labranza y con un tránsito, donde se alcanzaron valores superiores a los 7 MPa.

Curva de consolidación

En la Figura 3 se muestran, a modo de ejemplo, las curvas de consolidación en distintas condiciones de evaluación: previo y posterior a la labranza y bajo dos condiciones de humedad (equilibrado a -60 hPa y seco al aire) para un mismo suelo. A partir de ellas es posible identificar el punto de pre consolidación y la zona de consolidación primaria, estimar la capacidad de soporte, los módulos de deformación y recuperación y la máxima deformación.

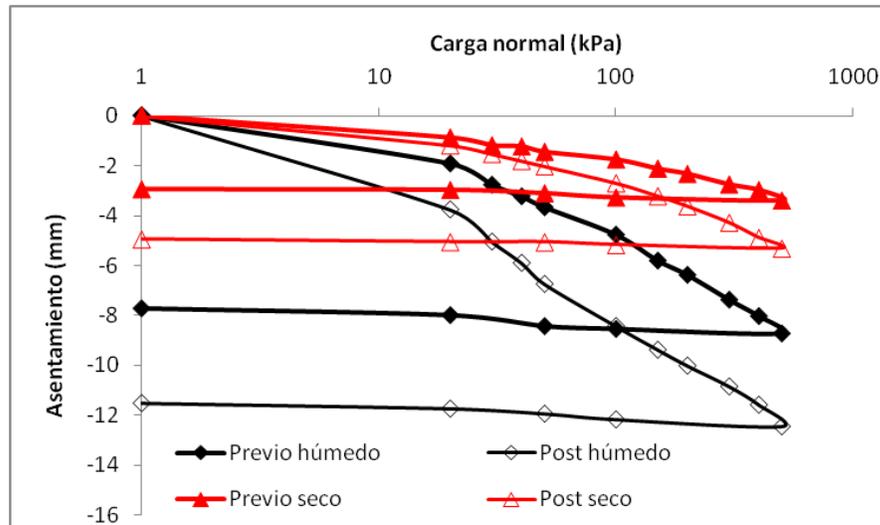


Figura 3. Curvas de consolidación típicas del sitio de pradera previo y posterior a la labranza, en dos condiciones de humedad (-60hPa y seco al aire).

Se puede apreciar el efecto de la labranza en el comportamiento mecánico del suelo al ser sometido a cargas externas. En la condición previa a la labranza, el suelo posee una estructura que se ha consolidado con el tiempo, por lo que es capaz de resistir las cargas externas sin deformarse tanto en relación a la condición post labranza. En ambas condiciones de humedad se observa que la consolidación tiene una mayor pendiente (deformación) en la condición post labranza. Esto se debe a que al dejar el suelo suelto con una alta porosidad, el tránsito posterior se transmite concentrado en torno al centro de carga, permitiendo un mayor reacomodo de partículas (Gupta y Raper, 1994).

Por otra parte, al comparar el comportamiento de las muestras equilibradas a -60 hPa y secas al aire, se puede ver el efecto del agua en la estabilidad mecánica, debido a la generación de tensiones internas, producto del secado del suelo (Schäffer *et al.*, 2007). Al humectarse las partículas, el agua actúa como lubricante, favoreciendo la mayor deformación del suelo (Horn *et al.*, 1994). Además, la prueba de consolidación se realizó con la muestra confinada pero con drenaje libre, por lo que se permite disipar la presión de las cargas aplicadas mediante el flujo de agua hacia el exterior. Lo anterior se refleja en una deformación más violenta y en un asentamiento mucho mayor que las muestras secas al aire.

Máxima deformación

En el Cuadro 7 se presenta el promedio de la máxima deformación alcanzada para cada tratamiento, sitio y profundidad. La prueba de consolidación se realizó con dos condiciones de humedad, equilibrio mátrico de -60 hPa y seco al aire. La máxima deformación se registró al llegar a la máxima carga aplicada en la prueba de consolidación, correspondiente a 500 kPa. En las muestras equilibradas a -60 hPa se alcanzan valores más altos de deformación debido al efecto lubricante que juega el agua en las partículas de suelo.

Cuadro 7. Promedios (\pm DE) de máxima deformación ($\sigma_n = 500$ kPa) en muestras equilibradas a -60 hPa y secas al aire, para cada tratamiento, sitio y profundidad.

N° Pasadas	-60 hPa (mm)		Seco al aire (mm)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	-7,75 (\pm 1,58) a	-8,72 (\pm 1,55) a	-4,82 (\pm 1,30) a	-3,38 (\pm 0,45) a
0	-6,75 (\pm 2,34) a	-12,44 (\pm 1,17) b*	-5,49 (\pm 0,66) a	-5,31 (\pm 0,50) b
1	-7,99 (\pm 1,26) a	-12,25 (\pm 0,90) b*	-4,31 (\pm 1,01) a	-6,22 (\pm 0,73) b*
3	-7,62 (\pm 0,62) a	-12,30 (\pm 0,67) b*	-4,76 (\pm 1,15) a	-5,17 (\pm 0,57) b
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	-7,73 (\pm 1,92) a	-7,19 (\pm 1,10) a	-3,67 (\pm 1,62) a	-3,93 (\pm 1,09) a
0	-7,10 (\pm 0,48) a	-9,94 (\pm 1,44) b*	-3,39 (\pm 1,15) a	-4,26 (\pm 1,16) a
1	-6,90 (\pm 1,01) a	-10,47 (\pm 0,96) b*	-2,17 (\pm 0,43) a	-5,25 (\pm 1,00) a*
3	-5,84 (\pm 1,32) a	-9,00 (\pm 0,93) ab*	-3,22 (\pm 0,54) a	-5,02 (\pm 0,89) a*

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

Al analizar el comportamiento superficial del sitio LC, se ve el efecto que tiene el agua sobre un suelo pobre en estructuración, lo que se refleja en la homogeneidad de los valores de deformación máxima en los distintos tratamientos. Al equilibrar las muestras a -60 hPa, sin importar la condición de tránsito o labranza, al poseer una estructuración débil el proceso de hidratación provoca el colapso del sistema poroso hasta una condición de homogenización (Fuentes *et al.*, 2011). Esta condición se repitió en estado seco al aire para el sitio LC, donde la baja estructuración genera también una baja estabilidad mecánica, con asentamiento inmediatamente después de la labranza. En condición seco al aire, y pese a no mostrar diferencias significativas, el tratamiento de 0 pasadas del sitio LC es el que alcanzó la mayor deformación, esto era esperable debido al espacio inter agregados que genera la labranza. Al transitar sobre el suelo preparado, se pierde este espacio poroso generado y es por esto que las cargas aplicadas en la prueba de laboratorio producen un menor asentamiento (Ellies, 1988; Fuentes *et al.*, 2013a).

En el caso del sitio P, existen diferencias estadísticamente significativas entre la condición pre y post labranza en ambas condiciones de equilibrio mátrico y en la muestra húmeda de 30-50 cm. Esto puede estar dado por el aumento considerable de macroporosidad que genera la labranza en el sitio P (Cuadro 5); es así como, al ser sometida a cargas constantes y crecientes (prueba de laboratorio), la macroporosidad colapsa y se destruye, logrando un asentamiento definitivo y considerablemente mayor que el sitio LC. En profundidad en cambio, se manifiestan mucho menos diferencias por efecto del paso de la maquinaria, ya que al estar el suelo en una condición no labrada, la estabilidad mecánica y su capacidad de deformación responde a un manejo con n cargas producto del tránsito de la temporada previa, incluso en sectores con baja intensidad de tránsito (Rücknagel *et al.*, 2007).

Las diferencias significativas que se encuentran entre sitios se relacionan con el porcentaje de macroporos presentes en cada caso (Cuadro 5), lo que se repite en las muestras que fueron extraídas en profundidad. Al correlacionar ambas variables se genera un ajuste lineal con una significancia cercana al 99% para el caso de las muestras húmedas ($\text{Def} = -0,63 \cdot \text{macroporos} - 4,646$) y del 95% para el caso de las muestras secas al aire ($\text{Def} = -0,255 \cdot \text{macroporos} - 2,735$). Resulta difícil atribuir diferencias debido a la estabilidad de los microagregados, ya que la carga aplicada es lo suficientemente grande como para no discriminar entre sitios. Sin embargo, respecto a los macroagregados, queda la incertidumbre si las unidades seleccionadas corresponden a agregados naturales o a terrones formados tras la labranza.

Módulos de deformación entre 20 y 50 kPa

La compactación del suelo es función principalmente de la magnitud de la presión ejercida por la maquinaria agrícola sobre la superficie del suelo. En promedio los tractores ejercen una presión entre los 80 y 120 kPa, esto sin tomar en cuenta que en la mayoría de los manejos agrícolas se suelen montar implementos que aumentan considerablemente la presión ejercida (Febo y Pessina, 2002). El Cuadro 8 muestra los módulos de deformación para rangos de carga baja, comprendidos entre los 20 y 50 kPa, en muestras equilibradas a -60hPa y secas al aire.

Cuadro 8. Promedios (\pm DE) del módulo de deformación comprendido entre los 20 y 50 kPa en muestras equilibradas a -60hPa y secas al aire, para cada sitio, sector y profundidad.

N° Pasadas	-60 hPa ($\mu\text{m/kPa}$)		Seco al aire ($\mu\text{m/kPa}$)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	40,3 (\pm 22,8) a	58,4 (\pm 14,5) a	22,5 (\pm 6,2) a	19,0 (\pm 3,9) a
0	31,3 (\pm 15,3) a	99,4 (\pm 15,2) b*	19,1 (\pm 7,4) a	27,9 (\pm 7,2) ab
1	42,1 (\pm 8,6) a	85,2 (\pm 11,8) ab*	17,3 (\pm 4,4) a	35,4 (\pm 5,9) b*
3	47,0 (\pm 8,6) a	101,0 (\pm 15,4) b*	28,8 (\pm 9,0) a	28,3 (\pm 7,4) ab
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	46,6 (\pm 12,3) a	46,9 (\pm 15,4) a	14,8 (\pm 5,6) a	24,6 (\pm 8,5) a
0	44,4 (\pm 8,8) a	81,8 (\pm 35,7) a	18,3 (\pm 5,4) a	25,3 (\pm 7,5) a
1	40,1 (\pm 7,5) a	73,0 (\pm 13,1) a*	13,1 (\pm 4,5) a	40,8 (\pm 8,2) b*
3	35,8 (\pm 15,4) a	64,2 (\pm 6,7) a*	18,3 (\pm 3,6) a	26,2 (\pm 3,7) ab*

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

En el sitio LC equilibrado a -60 hPa no existe gran variación en los módulos de deformación, con valores similares entre tratamientos en ambas profundidades. En condición seca al aire, si bien los módulos disminuyen, tampoco presentaron diferencias entre tratamientos. En el sitio P en la condición húmeda, se produjo un aumento significativo de este módulo posterior a la labranza (0-20 cm), con diferencias significativas respecto al sitio LC. En profundidad, si bien no se generan diferencias significativas entre tratamientos, sí existe la misma tendencia.

En las muestras superficiales secas al aire de P resulta interesante el efecto que tiene la tercera pasada de tractor, la cual casi iguala el módulo de deformación del sitio LC, después de que la primera pasada generara diferencias significativas entre estos mismos. El sitio P, al tener una mejor calidad de agregados, tiene la capacidad de disminuir el efecto de la consolidación entre la primera y la tercera pasada, a diferencia del sitio LC, en el cual el tránsito constante aumenta su módulo de deformación. Las cargas sucesivas (tránsito) en LC deben seguir destruyendo agregados (por su baja estabilidad físico-mecánica), en cambio P pierde los macroporos entre los agregados pero mantiene agregados intactos que manifiestan elasticidad por su mayor contenido de MO (Zhang y Hartge, 1995). Lo anterior se repite en profundidad, sin embargo, el sitio LC alcanza módulos significativamente más bajos que el sitio P.

Respecto a la diferencia entre las condiciones de humedad, donde los módulos de deformación para las muestras en condición seca al aire son considerablemente menores a aquellas en condición equilibrada a -60 hPa, puede estar explicada por las tensiones

internas que se generan a nivel de agregado cuando éstos se encuentran secos. Al respecto, Fuentes *et al.* (2013b) señalan que la porosidad al interior de los agregados está asociada a un alto grado de tortuosidad y bajo diámetro de poros y continuidad, lo que genera una mayor estabilidad producto de las tensiones internas que se generan en la condición seca. Por otro lado, Ellies (1986) determinó módulos de deformación para suelos rojo arcillosos y trumaos en rango de cargas bajas (26-100 kPa), en tres condiciones de humedad (seco, húmedo y saturado), donde los módulos obtenidos siempre fueron aumentando acorde aumentaba el contenido de agua de las muestras, mostrando una menor variabilidad entre estos en los suelos trumaos (Andisoles) que en los suelos rojo arcillosos (Ultisoles), debido principalmente a la mejor calidad estructural de los primeros.

Módulos de deformación entre 300 y 500 kPa

La maquinaria agrícola como las cosechadoras de forraje, tomate y remolacha, generan una presión promedio entre los 150 y 250 kPa sobre el suelo. Por otro lado, las máquinas que más presión ejercen son las de carga con un solo eje como algunos carros de acopio y transporte, pudiendo llegar a los 650 kPa de presión, dependiendo del modelo y la carga que transporte (Febo y Pessina, 2002). El Cuadro 9 muestra los módulos de deformación comprendidos entre los 300 y 500 kPa, en muestras equilibradas a -60 hPa y secas al aire libre.

Cuadro 9. Promedios (\pm DE) del módulo de deformación comprendido entre los 300 y 500 kPa en muestras equilibradas a -60hPa y secas al aire, para cada tratamiento, sitio y profundidad.

N° Pasadas	-60 hPa ($\mu\text{m}/\text{kPa}$)		Seco al aire ($\mu\text{m}/\text{kPa}$)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	5,6 (\pm 0,6) a	6,8 (\pm 0,5) a*	4,4(\pm 1,1) a	3,2 (\pm 0,7) a
0	5,0 (\pm 1,0) a	8,0 (\pm 3,4) a	5,1 (\pm 1,1) a	5,2 (\pm 0,5) b
1	4,3 (\pm 0,6) a	6,1 (\pm 1,3) a	4,4 (\pm 0,7) a	5,2 (\pm 1,1) b
3	4,3 (\pm 0,4) a	6,2 (\pm 0,8) a*	3,8 (\pm 1,5) a	5,7 (\pm 0,9) b*
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	5,4 (\pm 1,2) a	5,2 (\pm 0,7) a	4,5 (\pm 1,1) a	3,8 (\pm 1,3) a
0	4,5 (\pm 0,3) a	5,3 (\pm 0,8) a	3,7 (\pm 1,2) a	4,5 (\pm 1,3) a
1	4,9 (\pm 2,5) a	6,0 (\pm 1,1) a	3,0 (\pm 0,3) a	4,7 (\pm 1,8) a
3	4,8 (\pm 0,5) a	6,1 (\pm 0,6) a*	3,8 (\pm 1,4) a	5,7 (\pm 8,0) a

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

En este tramo de cargas la consolidación es mucho menor, ya que se ha reducido gran parte del espacio poroso (Kézdi, 1980). En las muestras superficiales equilibradas a -60 hPa se generaron diferencias significativas entre sitios para la condición previa a la labranza y luego de la tercera pasada de tractor, en tanto en profundidad se generó una diferencia entre LC y P en la tercera pasada de tractor; en todos los casos siempre el sitio LC tiene un menor módulo de deformación, en respuesta a los mayores niveles de densidad aparente, lo que denota un estado previo de consolidación mayor (Rücknagel *et al.*, 2007).

En cuanto a las muestras secas al aire, se puede ver que los valores de los módulos en el sitio LC son similares a los obtenidos en las muestras equilibradas a -60 hPa, en tanto en el sitio P disminuyeron ligeramente. También es posible ver que la labranza tiene un efecto significativo sobre este módulo en el sitio P entre 0-20cm, donde la soltura mecánica y la posterior estabilidad del sistema poroso permite que el suelo se siga deformando frente a cargas excesivas. Al comparar los resultados de las muestras en superficie y en profundidad, es posible ver que ambas tienen módulos bastante parecidos, lo que indica que con esas magnitudes de cargas el suelo pierde sus características por estratas, comportándose como un sistema homogéneo. Mientras más gruesa sea la textura, más alta será la densidad aparente y más baja la tensión mátrica, esperándose un menor estrés por compresión; por otra parte, la cantidad de agua drenada durante una prueba de consolidación es afectada no solo por la textura del suelo, la densidad aparente y el contenido inicial de agua, sino también por el tiempo del intervalo de carga (Krümmelbein *et al.*, 2008).

La deformación que experimenta el suelo depende de distintos factores y la relación entre estos. Es así como bajo condiciones de saturación, la curva de consolidación dependerá principalmente del estrés externo y la continuidad de poros para la evacuación del agua (Nearing, 1995), mientras que bajo condiciones no saturadas, las tensiones internas generan una mayor resistencia en el suelo (Mitchell, 1993), efecto que se observó en los rangos de carga baja (Cuadro 8).

Si se toma en cuenta la textura del suelo, se ha observado que a mayor contenido de arcilla y agua, más grande será la compresibilidad, pero esta interacción puede modificarse con el grado de desarrollo estructural del suelo (Seguel y Horn, 2006b; Seguel y Orellana, 2008). Los suelos ricos en partículas de tamaño arcilla, poseen una estabilidad dependiente de la presión de agua en los poros, debido a su pequeño tamaño, y también debido a su naturaleza expandible (Barzegar *et al.*, 1994). Por otro lado, se ha observado una mayor resistencia de agregados húmedos en suelos con alto contenido de materia orgánica que en aquellos con bajo contenido de materia orgánica, debido a su comportamiento hidrofóbico, que ralentiza la humectación y genera una gran estabilidad y resistencia (Zhang y Hartge, 1995; Fuentes *et al.*, 2013a). También se ha observado que para el mismo suelo y el mismo contenido de agua, un incremento en la densidad aparente se asocia con un aumento en la resistencia; sin embargo, para diferentes suelos esta relación no es válida, y el diámetro de los poros (relacionado con la textura de los suelos) tendría mayor influencia en la resistencia mecánica (Fuentes *et al.*, 2013b), lo que depende de la estructura y la fuerza de unión entre agregados (Seguel y Orellana 2008). Esto explicaría las diferencias entre las

muestras superficiales de P, donde la soltura mecánica generada por la labranza destruyó las uniones entre los agregados, los que poseen una alta resistencia individual, lo que permite la persistencia de poros inter agregados, los cuales se siguen asentando con altas presiones.

En cuanto a factores antrópicos, la labranza convencional favorece el cambio en la distribución de tamaño de poros a un tamaño más pequeño, disminuyendo los quiebres y planos de debilidad, los cuales están asociados directamente con la resistencia tensil, siempre y cuando la intensidad de la labranza no haya sido demasiado alta, en cuyo caso la estructura y la resistencia disminuirán (Horn, 2003).

Módulos de recuperación

La capacidad de recuperación o resiliencia es muchas veces utilizada como parámetro para definir la calidad de un suelo. Debido a esto, dentro de la prueba de consolidación también se midió la recuperación de las muestras, donde se liberó la carga aplicada de manera progresiva desde los 500 a 0 kPa. Estos datos permitieron calcular el módulo de recuperación para cada muestra, los cuales se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Promedios (\pm DE) del módulo de recuperación comprendido entre los 500 y 0 kPa en muestras equilibradas a -60hPa y secas al aire, para cada sitio, sector y profundidad.

N° Pasadas	-60 hPa ($\mu\text{m}/\text{kPa}$)		Seco al aire ($\mu\text{m}/\text{kPa}$)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	0,9 (\pm 0,2) a	2,0 (\pm 0,2) a*	0,7 (\pm 0,5) ab	0,9 (\pm 0,1) a
0	1,2 (\pm 0,6) a	1,9 (\pm 0,2) a	0,1 (\pm 0,2) a	0,7 (\pm 0,6) a
1	1,0 (\pm 0,2) a	1,7 (\pm 1,1) a	0,8 (\pm 0,4) ab	0,9 (\pm 0,7) a
3	1,1 (\pm 0,3) a	2,3 (\pm 0,6) a*	1,3 (\pm 0,2) b	0,5 (\pm 0,5) a*
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	0,9 (\pm 0,3) a	1,3 (\pm 0,4) a	0,5 (\pm 0,3) a	0,5 (\pm 0,3) a
0	1,1 (\pm 0,3) a	1,7 (\pm 0,8) a	0,8 (\pm 0,5) a	0,8 (\pm 0,6) a
1	1,4 (\pm 0,3) a	1,6 (\pm 0,1) a	1,2 (\pm 0,4) a	0,7 (\pm 0,8) a
3	1,2 (\pm 0,8) a	1,4 (\pm 0,3) a	1,0 (\pm 0,2) a	0,6 (\pm 0,4) a

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

En las muestras equilibradas a -60 hPa no se registraron diferencias significativas entre tratamientos. Por otro lado, resulta interesante destacar que las muestras que corresponden al sitio P siempre alcanzaron una mayor recuperación en comparación con aquellas del sitio

LC en ambas profundidades, aunque sin diferencias estadísticamente significativas entre 30 – 50 cm. Se obtuvieron diferencias significativas entre sitios a nivel superficial, para la condición previa y final (tercera pasada de tractor), donde P obtuvo los mayores valores de recuperación. La resiliencia de un suelo depende de sus características inherentes, específicamente de su calidad estructural, es por esto que el sitio P presentó los mayores valores de recuperación, asociada a un mayor contenido de materia orgánica (Zhang y Hartge, 1995).

Otro factor a considerar en la recuperación de un suelo es la reabsorción de agua, ya que las cargas aplicadas en la prueba de consolidación, al modificar la porosidad del suelo, generan cambios en el potencial mátrico, como lo demostró Peng *et al.* (2004), quienes caracterizaron la dinámica del potencial mátrico a lo largo de la prueba de consolidación para un suelo mineral. En dicho estudio determinaron que cargas bajas (< 60 kPa) no generaron grandes cambios en el potencial, sin embargo, al seguir aumentando las cargas, se produce un aumento sostenido del potencial debido a la destrucción del sistema poroso y la consecuente liberación de agua por efecto de las cargas altas (300-400 kPa), donde se produce la mayor formación de microporos. Finalmente, al liberar las cargas, se produce el aumento de volumen de suelo y la disminución del potencial hídrico, con el consecuente incremento de la resistencia.

En las muestras secas al aire del sitio LC, se generaron diferencias significativas entre la condición post-labranza (pasada 0) y la tercera pasada de tractor a nivel superficial, ya que después de la labranza el sistema es bastante inestable, debido a la pérdida de puntos de contacto entre sus partículas (Hartge, 2000). Esta inestabilidad determinó que el suelo presente una muy baja recuperación al ser sometido a cargas externas en condiciones de laboratorio. Por otro lado, cuando el tractor transita tres veces, genera un reacomodo de las partículas, aumentando los puntos de contacto que posteriormente previenen que la aplicación de la carga de 500 kPa genere la máxima deformación (Cuadro 7). Esta condición permite que se manifieste la plasticidad natural de las partículas; sin embargo, esta capacidad de recuperación se gana acosta de la pérdida de poros funcionales (Seguel y Orellana, 2008). Lo anterior no ocurre en el sitio P, donde la recuperación es bastante estable a lo largo de los tratamientos gracias a su calidad estructural. Pese a esto, en la tercera pasada de tractor en condición seco al aire existieron diferencias significativas entre ambos sitios, donde el sitio LC tuvo una mejor capacidad de respuesta que el sitio P. Lo anterior da cuenta de lo determinante que es el contenido de agua para la recuperación del sitio P, mientras que las muestras del sitio LC parecen ser menos dependientes del contenido de agua, ya que alcanzaron valores similares de recuperación en ambas condiciones (equilibrado a -60 hPa y seco al aire).

Capacidad de soporte

La capacidad de soporte corresponde a la máxima carga que puede soportar un suelo sin que presente una deformación de carácter plástico con pérdida de porosidad irreversible. Se determinó con el método gráfico de Pacheco Silva (Payahuala y Dörner, 2009), utilizando

las curvas de consolidación. En el Cuadro 11 se presentan los valores obtenidos.

Cuadro 11. Promedios (\pm DE) de la capacidad de soporte en muestras equilibradas a -60 hPa y secas al aire libre, para cada tratamiento, sitio y profundidad.

N° Pasadas	-60 hPa (kPa)		Seco al aire (kPa)	
	LC	P	LC	P
Superficie (0-20 cm)				
Previa	22,7 (\pm 10,2) a	28,6 (\pm 16,0) a	43,6 (\pm 16,3) a	36,4 (\pm 14,6) a
0	19,9 (\pm 9,00) a	8,0 (\pm 1,60) b*	54,7 (\pm 22,6) a	34,9 (\pm 2,20) a
1	8,4 (\pm 3,40) a	6,1 (\pm 3,40) b	46,1 (\pm 17,9) a	35,8 (\pm 7,90) a
3	10,4 (\pm 3,70) a	6,2 (\pm 4,70) b	32,1 (\pm 6,30) a	42,8 (\pm 8,20) a
Profundidad (30-50 cm)				
Previa	22,6 (\pm 6,90) a	18,7 (\pm 18,7) a	66,3 (\pm 39,9) a	46,3 (\pm 23,0) a
0	23,3 (\pm 6,50) a	6,2 (\pm 6,20) b*	85,3 (\pm 30,7) a	35,3 (\pm 5,40) a*
1	24,2 (\pm 3,40) a	7,1 (\pm 7,10) b*	71,2 (\pm 50,2) a	30,0 (\pm 11,0) a
3	40,7 (\pm 24,2) a	11,5 (\pm 4,50) ab	71,5 (\pm 32,6) a	56,6 (\pm 14,7) a

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada sitio y profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05). Asterisco (*) indica diferencias estadísticamente significativas en sentido horizontal entre los sitios en cada n° de pasadas y profundidad. LC: Labranza convencional; P: Pradera.

Para la condición húmeda (-60 hPa), tanto en superficie como en profundidad, las muestras extraídas del sitio P bajaron significativamente su capacidad de soporte tras la labranza, efecto que se mantuvo con los posteriores tránsitos de tractor. Por otro lado, el sector LC también disminuyó su capacidad de soporte entre 0-20 cm, pero de manera menos drástica. Esta diferencia se debe al efecto que tiene el agua en las muestras; en el sitio LC, el hecho de humectar las muestras para luego equilibrarlas a -60 hPa generó un asentamiento debido a su menor estabilidad estructural; este asentamiento previo le permite posteriormente resistir de mejor manera las cargas dentro de la prueba de consolidación, ya que se genera un rápido incremento de la densidad aparente con el consecuente aumento de la capacidad de soporte (Rücknagel *et al.*, 2007). En el sitio P la humectación no produce este asentamiento previo, sin embargo, durante la prueba de consolidación el agua funciona como un agente lubricante que disminuye su capacidad de soporte (Tang *et al.*, 2009). Lo anterior se sustenta al comparar estos resultados con los de las muestras secas al aire, en la cual es posible ver que no se generaron diferencias significativas entre tratamientos y sitios. Por otro lado, los valores de capacidad de soporte para el sitio LC evaluado en condición seca al aire, son mayores que aquellos determinados por Seguel y Horn (2006a) para un Mollisol también perteneciente a Chile central, el cual ha sido labrado durante décadas. En dicho estudio se obtuvieron valores de 23 y 45 kPa en superficie (0-10 cm) y profundidad (40-60cm) respectivamente, resultado que denota la importancia de la frecuencia e intensidad de labranza sobre propiedades físicas del suelo (Agostini *et al.*, 2012).

A modo general, el sitio LC presentó una mayor capacidad de soporte que el sitio P, lo que puede estar relacionado al tamaño de poros y su estabilidad, ya que poros más grandes requieren de una menor carga para colapsar que aquellos más pequeños (Horn, 2003). En relación a lo anterior, Fuentes *et al.* (2013a) compararon la capacidad de soporte de agregados en dos condiciones (sin intervención y bajo labranza) en dos Mollisoles de Chile central, donde en ambos suelos la mayor capacidad de soporte la alcanzó la condición bajo labranza, mostrando diferencias significativas con la condición no intervenida.

Resumen módulos y recuperación elástica

Con el propósito de comparar los factores manejo y profundidad en cada contenido de agua, independiente del número de pasadas, el Cuadro 12 presenta los promedios entre tratamientos en sus módulos de deformación y recuperación.

Cuadro 12. Promedios (\pm DE) de los módulos de deformación y recuperación en muestras equilibradas a -60 hPa y secas al aire, para cada sitio y profundidad.

Sector	Módulo 20-50 kPa ($\mu\text{m/kPa}$)	Módulo 300 a 500 kPa ($\mu\text{m/kPa}$)	Recuperación ($\mu\text{m/kPa}$)
-60 hPa			
LC 0-20 cm	40,2(\pm 6,5) a	4,8(\pm 0,6) a	1,1(\pm 0,1) a
LC 30-50 cm	41,7(\pm 4,8) a	4,9(\pm 0,4) a	1,2(\pm 0,2) ab
P 0-20 cm	86,0(\pm 19,7) b	6,8(\pm 0,9) b	2,0(\pm 0,2) c
P 30-50 cm	66,5(\pm 14,9) ab	5,6(\pm 0,5) ab	1,5(\pm 0,2) b
Seco al aire			
LC 0-20 cm	21,9(\pm 5,1) ab	4,4(\pm 0,5) a	0,7(\pm 0,5) a
LC 30-50 cm	16,1(\pm 2,6) a	3,7(\pm 0,6) a	0,9(\pm 0,3) a
P 0-20 cm	27,6(\pm 6,7) ab	4,8(\pm 1,1) a	0,7(\pm 0,2) a
P 30-50 cm	29,2(\pm 7,7) b	4,6(\pm 0,8) a	0,6(\pm 0,1) a

Promedios unidos por letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en un mismo contenido de humedad, según el test de Tukey (p value $<$ 0,05). LC: Labranza convencional; P: Pradera.

En el módulo entre los 20 y 50 kPa, las muestras equilibradas a -60 hPa del sitio P sufrieron un asentamiento considerablemente mayor que aquellas del sitio LC, donde el sitio P superficial alcanzó casi el doble de asentamiento que aquellos del sitio LC, mostrando diferencias significativas en las muestras de 0 – 20 cm. Sin embargo, este comportamiento no es tan notorio cuando se analizan las muestras secas al aire, aunque igualmente se encontraron diferencias significativas entre sitios en las muestras extraídas entre los 30 y 50 cm. El mayor asentamiento en las muestras equilibradas a -60 hPa se relaciona con la acción lubricante del agua, que hace perder estabilidad al suelo (Seguel y Horn, 2006b), y que en el caso del sitio de P se ve potenciado por el mayor contenido de arcilla.

Los valores del módulo entre los 300 y 500 kPa son considerablemente menores a aquellos

entre los 20 y 50 kPa, debido principalmente al menor volumen de poros remanentes en aquel rango de la prueba de consolidación (Hartge, 2000). En este módulo, el contenido de agua inicial de la muestra ya no tiene gran preponderancia en la deformación, por lo que las diferencias entre las muestras equilibradas a -60 hPa y secas al aire es mucho menor a la descrita para el módulo entre los 20 y 50 kPa. Pese a lo anterior, nuevamente el sitio P superficial mostró diferencias significativas con el sitio LC, demostrando que a altas cargas mecánicas aún persiste sistema poroso que no fue deformado por las cargas precedentes.

La recuperación fue mayor en el suelo equilibrado a -60 hPa, donde las muestras del sitio P obtuvieron la mayor recuperación. Para estas mismas muestras, se encontraron diferencias significativas entre las profundidades del sitio P, lo que debe estar relacionado con el contenido de materia orgánica y procesos de reabsorción de agua una vez que se liberan las cargas (Peng *et al.*, 2004). Por otro lado, la recuperación en las muestras secas al aire obtuvo bajos valores y no se encontraron diferencias significativas.

CONCLUSIONES

El mayor contenido de materia orgánica en el suelo manejado con pradera determinó una mejor estructuración, la cual permitió conservar el efecto positivo de la labranza, con menores valores de densidad aparente y mayor nivel de macroporosidad en relación al suelo manejado con labranza convencional tras ser transitada reiteradamente.

En las pruebas de consolidación, el suelo bajo labranza convencional fue el que alcanzó en general los menores módulos de deformación y la mayor capacidad de soporte, como resultado del deterioro estructural de este manejo por efecto de la labranza y posterior tránsito, resultando en una alta densidad aparente, bajo porcentaje de macroporosidad y una alta resistencia mecánica.

El sitio de pradera presentó un predominio de macro y meso porosidad, que si bien son positivos desde el punto de vista agronómico, determinaron un suelo más sensible a acciones mecánicas externas posterior a la labranza. Finalmente, tras liberar la carga, el suelo de la pradera tuvo una mayor recuperación elástica que el de labranza convencional, como resultado del mayor contenido de materia orgánica y su dinámica con el agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E. y E. Martínez. 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos. (cap.). En: *Acevedo, E. (ed). Sustentabilidad en cultivos anuales*. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 184p. (Serie Ciencias Agronómicas N°8).
- Agostini, M.; G. Studdert; S. San Martino; J. Costa; R. Balbuena; J. Ressia; G. Mendivil and L. Lázaro. 2012. Crop residue grazing and tillage systems effects on soil physical properties and corn (*Zea Mays* L.) performance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12(28): 271-282.
- Alleto, L. and Y. Coquet. 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma* 152: 85-94.
- Arvidsson, J. and T. Keller. 2007. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research* 96(2): 284-291.
- Bachmann, J.; K. Contreras; K. Hartge and R. MacDonald. 2006. Comparison of soil strength data obtained *in situ* with penetrometer and with vane shear test. *Soil & Tillage Research* 87: 112-118.
- Barto, E.; F. Alt; Y. Oelmann; W. Wilcke and M. Rillig. 2010. Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 42(12): 2316-2324.
- Barzegar, A.; J. Oades; P. Rengasamy and R. Murray. 1994. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma* 65(1): 93-108.
- Buyanovsky, G.; M. Aslam and G. Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science Society of America Journal* 58(4): 1167-1173.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1996. Estudio agrológico: Región Metropolitana. Chile. 425p.
- Chenu, C. and F. Plante. 2006. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “primary organo-mineral complex”. *European Journal of Soil Science* 57: 596-607.
- Dexter, A.; E. Czyz and O. Gate. 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research* 79(2): 185-189.
- Dörner, J.; D. Dec; F. Zúñiga; R. Horn; I. López; C. Leiva and J. Cuevas. 2013. Changes in the physical quality of an Andosol under different management intensities in Southern Chile. (cap.). In: *Krümmelbein, J.; R. Horn y M. Pagliai. (ed.). Soil degradation*. Reiskirchen, Germany: Catena. 352p. (Advances in Geocology. Vol. 42).
- Ellies, A. 1986. Efectos de la consolidación mecánica sobre algunos Distrandeptes y Palehumultes del sur de Chile. *Ciencia del Suelo* 2: 91-97.
- Ellies, A. 1988. Mechanical consolidation in volcanic ash soils. (pp.87-92). En: *Drescher, J.; R. Horn and M. de Boodt*. Impact of water and external forces on soil structure. Germany. 171p. (Catena Supplement 11).
- Ellies, A.; C. Ramírez y R. Mac Donald. 1993. Cambios en la porosidad de un suelo por efecto de su uso. *Turrialba* 43(1): 72-76.
- Ellies, A. 1999. Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al

- tránsito de maquinaria. *Bosque* 20(1): 37-45.
- Ellies, A. y J. Dörner. 1999. Distribución de tensiones en un suelo Palehumult ejercida con el tráfico de la maquinaria agrícola. *Agro Sur* 27(2): 1-9.
- Ernst, O. and G. Siri-Prieto. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research* 105(2): 260-268.
- Febo, P. and D. Pessina. 2002. Soil compaction: The ground pressure exerted by agricultural machines. (cap. 4. pp.339-350). In: *Pagliai, M. and R. Jones (ed.). Sustainable land management – environmental protection: A soil physical approach.* Germany: Catena. 588p. (Advances in Geocology. Vol. 35).
- Franzluebbers, A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66(2): 95-106.
- Fuentes, I.; O. Seguel y M. Casanova. 2011. Degradación física de suelos de la zona central versus suelos volcánicos del sur de Chile. En: Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo (Julio de 2011, Santiago, Chile). Santiago, Chile: Universidad de Chile. 7p.
- Fuentes, I.; O. Seguel and M. Casanova. 2013a. Elasto-plastic behaviour of soil aggregates and the soil matrix as a function of physical properties in three soils of central Chile. (cap.). In: *Krümmlbein, J.; R. Horn y M. Pagliai. (ed.). Soil degradation.* Reiskirchen, Germany: Catena. 352p. (Advances in Geocology. Vol. 42).
- Fuentes, I.; O. Seguel and M. Casanova. 2013b. Shear strength of aggregates compared with bulk soil of two haploxerolls from Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(4): 819-831.
- Glab, T and B. Kulig. 2008. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research* 99(2): 169-178.
- Gupta, S and Raper. R. 1994. Prediction of soil compaction under vehicles. (cap.). In: *Soane, B y C. van Ouwerkerk. Soil compaction in crop production.* Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B.V. 71-99.
- Hartge, K. 2000. The effect of soil deformation on physical soil properties: A discourse on the common background. (cap. 1, pp.32-43). In: *Horn, R.; J. van den Akker and J. Arvidsson (Ed.). Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences.* Germany: Catena. 462p. (Advances in Geocology. Vol. 32).
- Hartge, K und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Boden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178p.
- Haynes, R.; R. Swift and R. Stephen. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture arable) on organic matter content, water stable aggregations and clodporosity in a group of soils. *Soil and Tillage Research* 19(1): 77–87.
- Haynes, R. and M. Beare. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29(11-12): 1647-1653.
- Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. USA: Elsevier. 771p.
- Horn, R.; H. Taubner; M. Wuttke and T. Baumgartl. 1994. Soil physical properties related to soil structure. *Soil & Tillage Research* 30(2-4): 187-216.
- Horn, R. 2003. Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 116(1): 77-88.
- Horn. R.; K. Hartge; J. Bachmann and M. Kirkham. 2007. Mechanical stresses in soils

- assessed from bulk-density and penetration-resistance data sets. *Soil Science Society of America Journal* 71(5): 1445-1459.
- Horn, R and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research* 102(2): 201-208.
- Jorajuría, D. 2005. Compactación del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular. Una revisión. (pp. 39-55). *En su: Reología del suelo agrícola bajo tráfico*. Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. 157p.
- Juárez, E y A. Rico. 2005. Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tercera edición. D.F, México: Limusa. 644p.
- Kay, B and Angers. 2002. Soil structure. (cap. 7, pp.249-283). *In: Warrick, A. (ed.). Soil physics companion*. New York: CRC Press. 389p.
- Kézdi, A. 1980. Handbook of soil mechanics. Vol 2. Soil testing. The Netherlands, Amsterdam, Elsevier Publishing Company. 258p.
- Krümmelbein, J.; Peth, S. and Horn, R. 2008. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil & Tillage Research* 99: 139-148.
- Lal, R. and M. Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. New York, EEUU: Marcel Dekker Inc. 682p.
- Levy, G and A. Mamedov. 2013. Soil susceptibility to deformation in different agricultural management practices: Assessment from water retention curve characteristics at low suction. (cap.). *In: Krümmelbein, J.; R. Horn and M. Pagliai. (ed.). Soil degradation*. Reiskirchen, Germany: Catena. 352p. (Advances in Geocology. Vol. 42).
- Logsdon, S.; T. Kasper and C. Camberdella. 1999. Depth incremental soil properties under no till or chisel management. *Soil Science Society of America Journal* 63(1): 197-200.
- Martínez, E.; J. Fuentes y E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 8(1): 68-96.
- Mitchell, J. 1993. Effective, intergranular, and total stress. (cap. 9, pp. 161-171). *In: Fundamentals of soil behavior*. Second edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 437p.
- Mordhorst, A.; I. Zimmermann; S. Peth and R. Horn. 2012. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem. *Soil & Tillage Research* 125: 3-13.
- Mulumba, L and R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 98: 106-111.
- Nearing, M. 1995. Compressive strength for an aggregated and partially saturated soil. *Soil Science Society of America Journal* 59(1): 35-38.
- Osunbitan, J.; D. Oyedele and K. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 82(1): 57-64.
- Payahuala, M y J. Dörner. 2009. Determinación de la capacidad de soporte de un Andisol (Duric Hapludand) por medio de dos métodos gráficos. *Agro Sur* 37(3): 220-231.
- Peng, X.; R. Horn; B. Zhang and Q. Zhao. 2004. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. *Soil and Tillage Research* 76(2): 125-137.

- Reynolds, W.; C. Drury; C. Tan; C. Fox and X. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263.
- Rücknagel, J.; B Hofmann; R. Paul; O, Christen and K. Hülsbergen. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil and Tillage Research* 92(1-2): 213-220.
- Sadzwarka, A.; M. Carrasco; R. Grez; G. Mora; H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. (Serie Actas INIA N°34). Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 164p.
- Salvo, L.; J. Hernández and O. Ernst. 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research* 109(2): 116-122.
- Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chillán, Chile: Universidad de Concepción. 80p. (Departamento de Suelos y Recursos Naturales Universidad de Concepción. Publicación N° 5).
- Schäffer, B.; W. Attinger and R. Schulin. 2007. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery. Soil physical and mechanical aspects. *Soil and Tillage Research* 93(1): 28-43.
- Schäffer, B.; P. Boivin and R. Schulin. 2010. Compressibility of repacked soil as affected by wetting and drying between uniaxial compression tests. *Soil Science Society of America Journal* 74(5): 1483-1492.
- Schjonning, P.; M. Lamandé; F. Togersen; J. Arvidsson and T. Keller. 2006. Distribution of vertical stress at the soil-tyre interface: Effects of tyre inflation pressure and the impact on stress propagation in the soil profile. (cap). In: Horn, R.; H. Fleige; S. Peth and X. Peng. (ed.). Soil management for sustainability. Reiskirchen, Germany: Catena. 502p. (Advances in Geocology. Vol. 38).
- Schoeneberger, P.; D. Wysocki; E. Benham and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils. Lincoln, Nebraska: Natural Resources Conservation Service. 302p.
- Seguel, O and R. Horn. 2006a. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169(2): 221-232.
- Seguel, O and R. Horn. 2006b. Strength regain in soil aggregate beds by swelling and shrinkage. *International Agrophysics* 20: 161-172.
- Seguel, O y I. Orellana. 2008. Relación entre las propiedades mecánicas de suelos y los procesos de génesis e intensidad de uso. *Agro Sur* 36(2): 82-92.
- Seguel, O.; C. Baginsky; A. Contreras; J. Covarrubias; C. Gonzalez and M. Sandoval. 2011. Changes in physical properties of a Typic Haplocambid by anual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 11(1):1-15.
- Semmel, H.; R. Horn; A. Dexter and E. Schulz. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology* 3(2). 113-129.
- Sene, M.; M Vepraskas; G. Naderman and H. Denton. 1985. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal* 49: 422-427.

- 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 and Tillage Research* 79(1): 7-31.
- Tang, A.; Y. Cui; J. Eslami and P. Défossez. 2009. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma* 148: 282-290.
- Taylor, H and G. Brar. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research* 19(2-3): 111-119.
- Uribe, J.; R. Cabrera; A. de la Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas bioclimático de Chile. Santiago de Chile. 229p.
- Usowicz, B and J. Lipiec. 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity* 6(3): 263-271.
- Vaz, C.; J. Manieria; I. C. de Maria and M. Tuller. 2011. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma* 166: 92-101.
- Warrick, A. 2002. Soil physics companion. New York: CRC Press. 389p.
- Zhang, H and K. Hartge. 1995. Mechanical properties of soils as influenced by the incorporation of organic matter. (cap. 6, pp. 93-108). In: *Hartge, K and B. Stewart*. Soil structure its development and function. United States of America: Lewis Publishers. 423p.
- Zhang, B.; R. Horn and P. Hallett. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 69(3): 864-871.
- Zotarelli, L.; B. Alves; S. Urquiaga; R. Boddey and J. Six. 2007. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. *Soil and Tillage Research* 95(1): 196-206.

APÉNDICES

Apéndice 1

Resistencia a la penetración

N° Pasadas	Profundidad (cm)						
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	40-50
Resistencia (kPa)							
P inicial	1042 a (± 196)	2488 a* (± 433)	3274 a (± 677)	3935 ab (± 944)	4461 a (± 1276)	5356 a * (± 709)	6193 a (± 1310)
P 0	640 a* (± 168)	1485 ab (± 849)	3837 ab* (± 1549)	4704 a* (± 1440)	4558 a (± 772)	6248 a (± 1360)	5770 a* (± 280)
P 1	619 a (± 638)	1154b (± 571)	1761 b (± 378)	2476 bc (± 533)	3914 ab* (± 762)	5943 a* (± 801)	6021 a (± 1190)
P3	644 a (± 115)	2287 ab (± 695)	2477 ab (± 338)	2220 c (± 400)	2705 b* (± 535)	4537 a (± 1870)	4468 a (± 432)
LC inicial	638 a (± 443)	1479 a (± 770)	2675 a (±1673)	4038 a (± 1980)	3807 a (± 816)	2030 (± 622)	3058 (± 2577)
LC 0	414 a (± 139)	1047 a (± 392)	1636 a (± 893)	1565 a (± 1116)	4982 a (± 2114)	8026 (± 1858)	8220
LC 1	470 a (± 104)	851 a (± 254)	1523 a (± 719)	2376 a (± 898)	6848 a (± 1101)	9196#	---
LC 3	472 a (± 151)	1307 a (± 824)	2751 a (± 1616)	4165 a (± 2697)	6547 a (± 2717)	5990 (± 3366)	3173

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (n° de pasadas) dentro de cada manejo y en cada rango profundidad, según el test de Tukey (pvalue < 0,05).

Asterisco (*) indica diferencias entre manejos para el mismo tratamiento y en cada rango de profundidad (pvalue<0,05).

Sólo se pudo medir en una repetición.

--- No hubo medición