

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

ESTABILIZACION DE CAMELLONES CON CULTIVO DE MANDARINO (*Citrus reticulata*) MEDIANTE EL USO DE DOS FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA, IV REGIÓN DE CHILE.

ESTEBAN FRANCISCO MARIN ROJAS

SANTIAGO – CHILE

2011

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

ESTABILIZACION DE CAMELLONES CON CULTIVO DE MANDARINO (*Citrus reticulata*) MEDIANTE EL USO DE DOS FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA, IV REGIÓN DE CHILE.

STABILIZATION OF RAISED BEDS CULTIVATED WITH MANDARIN THROUGH THE USE OF TWO SOURCES OF ORGANIC MATTER. REGION IV, CHILE

ESTEBAN FRANCISCO MARIN ROJAS

SANTIAGO – CHILE

2011

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

ESTABILIZACION 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.

ESTEBAN FRANCISCO MARIN ROJAS

Profesores Guías	Calificaciones
Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo Dr.	6,8
Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, M.Sc.	7,0
Profesores Evaluadores	
Ian Homer Bannister Ingeniero Agrónomo Dr.	6,8
Alejandro León S. Ingeniero Agrónomo Dr.	6,8

SANTIAGO – CHILE
2011

Agradecimientos

Este trabajo se lo dedico a mi madre, sin ella nada de esto hubiera sido posible, por cosas de la vida ella debió partir y no pudo ver finalizado su trabajo, pero siempre creyó en mi y deposito toda su confianza en mis capacidades. También va dedicada a mi familia y a mis amigos, en especial los de la universidad quienes me dieron la fuerza para poder seguir adelante y con los que pase mis mejores momentos en la universidad.

Agradezco a mis profesores guías Oscar Seguel y Manuel Casanova, quienes me ayudaron a realizar mi memoria y sin ellos esto no hubiera sido posible, al laboratorio de física de suelos y a todas las personas que me ayudaron a realizar este trabajo. Gracias profesor Seguel por su apoyo y comprensión.

Gracias madre por todo nunca te olvidare, siempre estarás presenta en mi vida y daré lo mejor de mi en todo lo que realice. Tu recuerdo me da la fuerza y determinación para poder seguir cada día.

ÍNDICE

RESUMEN	1
Palabras claves.....	1
ABSTRACT	2
<i>Key words</i>	2
INTRODUCCIÓN	3
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Tratamientos y diseño del experimento.....	7
Propiedades de suelo evaluadas.....	8
Análisis estadístico.....	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
Propiedades físicas generales.....	11
Estabilidad de agregados.....	16
Velocidad de infiltración.....	17
Estabilidad mecánica del suelo.....	19
Resistencia a la penetración.....	19
Consolidación.....	20
CONCLUSIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	24
APÉNDICE I	29

RESUMEN

Los camellones son una opción para habilitar suelos con restricciones físicas tales como una escasa profundidad efectiva y la existencia de capas limitantes del perfil. No obstante, durante su construcción la estructura del suelo es fuertemente alterada, generándose procesos de asentamiento y aumentando la erodabilidad de éste. En el presente trabajo se evaluó el efecto estabilizador individual y conjunto de dos tipos de acondicionadores orgánicos sobre camellones cultivados con mandarino (*Citrus reticulata*, var. *Clementina*) en un Vertisol (Typic Haplotorrert) de la Región de Coquimbo. Los tratamientos aplicados fueron (T1) testigo, (T2) aplicación de ácido húmico, (T3) incorporación de rastrojo de trigo, (T4) ácido húmico y rastrojo de trigo. Se realizaron muestreos a tres profundidades (0-10, 10-30 y 30-60 cm) con tres repeticiones, evaluando propiedades físicas del suelo 90 días después de su aplicación. La forma de aplicación de los acondicionadores determinó la profundidad a la que éstos fueron más efectivos, destacando el ácido húmico, que al ser aplicado junto al agua de riego, generó mayores efectos en profundidad. Por otra parte, el rastrojo de trigo quedó incorporado en mayor proporción a profundidades bajo los 10 cm, expresando sus mayores efectos a partir de esta profundidad. Los tratamientos T2 y T4 fueron los más efectivos, disminuyendo la densidad aparente y la resistencia a la penetración, producto del aumento en la estabilidad de los microagregados y de la porosidad gruesa, lo que se tradujo en una mayor velocidad de infiltración. El tratamiento T3, si bien produjo los mismos beneficios sobre las propiedades físicas ya mencionadas, fueron de menor magnitud. El ácido húmico reacciona de forma casi inmediata con las partículas del suelo, generando mejoramientos en el corto plazo. El rastrojo de trigo fue menos efectivo que el ácido húmico, en cuanto a su aporte como acondicionador físico, lo que responde a un mayor tiempo requerido para descomponerse y así efectuar esta acción.

Palabras clave: Ácido húmico, propiedades físicas de suelo, asentamiento de suelo.

ABSTRACT

Raised beds are an option to improve soils with physical constraints such as shallowness and/or restricted layers in the profile, among other. However when the construction of the raised beds soil structure is severely altered, increasing soil settlement and soil erodibility processes. This study evaluated the stabilizing effect of two types of organic conditioner on raised beds cultivated with mandarins (*Citrus reticulata*, var. *Clementina*) in a Vertisol (Typic Haplotorrert) of the Coquimbo Region of Chile. The treatments were (T1) control, (T2) humic acid application, (T3) wheat straw incorporated into the soil, (T4) humic acid and wheat straw. Samples were taken at 0-10, 10-30 and 30-60 cm depth, with three replications and after 90 days some soil physical properties were evaluated. The application method of conditioners determined depths at which they were more effective, being the humic acid incorporated with irrigation the best. Instead, wheat straw incorporated mainly at 10 cm depth, expressed more impact from this depth on. Treatments T2 and T4 were the most effective, decreasing the bulk density and penetration resistance, due to increased microaggregates stability and coarse porosity, which resulted in a higher water infiltration rate. Similar but less expressed effects were observed in T3 treatment. The humic acid reacts almost immediately with soil particles, favouring short-term improvements, but wheat straw requires more time to decompose and perform a better conditioner action.

Key words: Humic acid, soil physical properties, soil settlement.

INTRODUCCIÓN

En el periodo 2004/2009 el sector productor de mandarina (*Citrus reticulata*) ha tenido un interesante desarrollo, con un crecimiento de casi 40. Hoy en día se señala que la superficie nacional es de 1.800 ha con tendencia creciente, de las cuales sobre el 40% del área plantada se ubica en la IV Región% (Bravo, 2009).

A consecuencia de la mayor demanda por superficie agrícola se han habilitado sectores considerados marginales para la explotación frutícola, con problemas de profundidad efectiva o mala estructuración. Sin embargo, en el caso de la IV Región se cuenta con una condición climática excelente para las actividades frutícolas, especialmente en lo que se refiere a una elevada radiación solar y a una escasa incidencia de heladas (Razeto y Fichet, 1996).

Las características del sistema radicular en cítricos depende tanto del portainjerto como de la variedad pero, a diferencia de árboles frutales de hoja caduca, sus hidratos de carbono no los acumula en las raíces durante el invierno, determinando dos misiones principales de la raíz: el anclaje y la absorción. En su función de anclaje, se ha visto que las raíces de los cítricos pueden penetrar hasta 5 ó 6 m en suelos arenosos, mientras que en suelos arcillosos prevalecen raíces menos profundas (Ortiz, 2002). En mandarinos, la sección transversal de sus raíces es epitrófica horizontal (más amplia en la parte superior, cerca de la superficie del suelo) a diferencia de los limoneros (Ortiz, 2002). Gregory (2006) precisa que las raíces de los cítricos, en general, presentan una mayor longevidad que las de otros frutales.

Una manera de habilitar suelos con escasa profundidad efectiva y eludir la asfixia radicular provocada por las lluvias invernales es establecer los cultivos sobre "camellones", que corresponden a una acumulación del mismo suelo del sector sobre la línea previo a la plantación en la forma de una hilera. Sin embargo, en el país no hay suficientes estudios que analicen la estabilidad físico-mecánica del suelo, considerando que el camellón está en un continuo proceso de estabilización (Cortés, 2011; Sagredo, 2005). En el extranjero tampoco es posible encontrar abundante información al respecto, salvo Srivastava y Shyam Singh (2007) quienes consideran un concepto de eficiencia del huerto en mandarinos para diversas propiedades de suelo, de las cuales destaca el contenido de arcilla como relevante.

El suelo de los camellones, debido al proceso de asentamiento del material y al tránsito al que se ven sometidos por las labores culturales propias del cultivo, se va degradando físicamente; esto es, incrementa su resistencia mecánica y disminuye la tasa de infiltración de agua (Cortés, 2011). Müller *et al.* (2009) destacan una elevada variabilidad no solo de propiedades tales como el contenido de agua, sino también de la densidad aparente del camellón. Estos hechos, entre otros, determinan la necesidad de investigar acerca del manejo y la mantención de la integridad de ellos.

Aparte de la erosión, uno de los principales problemas físicos que afecta a los suelos es la compactación (Lal, 1988). Ésta ocurre cuando se sobrepasa la capacidad de soporte del suelo y se genera un aumento de su densidad aparente. A través de este proceso se redistribuye el volumen poroso lo que afecta su funcionalidad, expresada por la

capacidad de conducir fluidos; se incrementa consecuentemente el riesgo a la erosión hídrica (Hartge y Horn, 1991; Hillel, 1998) y de allí que comúnmente se vincule íntimamente a ambos procesos. Adicionalmente, la compactación provoca un efecto restrictivo de carácter permanente en el tiempo sobre el desarrollo radical (Hakansson y Reeder, 1994).

Los medios porosos como el suelo, no tan solo son evaluados por su volumen total o por la distribución del tamaño de poros, sino también por la capacidad de transmitir fluidos como el agua o gases (Dörner y Horn, 2006). La permeabilidad del suelo a estos fluidos, como una función de los poros, depende exclusivamente de las características del material, por lo tanto, es una propiedad exclusiva del medio poroso y su geometría (Hillel, 1998).

Los factores geométricos que gobiernan la capacidad de transmitir fluidos en el sistema poroso son la porosidad total, la distribución de tamaños de los poros, su forma, continuidad y tortuosidad (Bear, 1972). Estos factores están estrechamente ligados a la estructura del suelo, la que depende de sus ciclos de humedecimiento (hinchamiento) y secado (contracción) y de la acción de la materia orgánica (Horn y Smucker, 2005). Por esta razón, tanto la velocidad de infiltración como la conductividad hidráulica son propiedades que permiten estimar valores de continuidad, o de organización de los poros, constituyendo ambas buenas herramientas para evaluar los efectos en el suelo de las enmiendas que se apliquen a éste.

Es conocido que los suelos muestran una cierta resistencia mecánica, tanto a la compresión como a la tracción, sin las cuales el suelo se deformaría, resultando en asentamientos o colapsos de material (Horn, 2003). Esta resistencia mecánica tiene un registro histórico, que es posible estimar conociendo la curva de pre-compresión del suelo (Kézdi, 1980). Si se supera esta resistencia, el suelo se deforma de manera irreversible, implicando cambios volumétricos del suelo a expensas de la porosidad. La reducción cuantitativa y cualitativa (redistribuciones del sistema poroso), provoca la disminución de la porosidad gruesa y el aumento de la porosidad fina, con efectos colaterales, como pérdida en la conductividad de fluidos (Marshall y Holmes, 1988; Horn, 2003).

Como el camellón está constituido de suelo suelto, inicialmente no tiene capacidad de soporte, por lo que se asienta a expensas del colapso del sistema poroso grueso (Cortés, 2011). La estabilización entonces resulta esencial para mantener la funcionalidad del suelo. Dentro de las opciones de manejo utilizadas en la agricultura, para mejorar las propiedades físicas del suelo, se encuentran la incorporación de rastrojo y el uso de ácidos húmicos aplicados vía riego. Así, como la resistencia mecánica natural del suelo está dada por la aparición de puntos de contacto entre las partículas, es la materia orgánica (MO) que recubre las partículas de suelo la que, forma películas alrededor de éstas, aumentando dichos puntos de contacto; además, a través de las uniones órgano-minerales se favorece la estabilización de las partículas en agregados de suelo (Baumgartl y Horn, 1991).

Los ácidos húmicos, como moléculas orgánicas complejas formadas por la descomposición de la MO, contribuyen significativamente a la estabilidad y fertilidad del suelo, resultando en un crecimiento mayor de la planta y en el incremento en la absorción de nutrientes (Keeling, 1994). Estas moléculas orgánicas se combinan y

recubren las partículas inorgánicas del suelo formando agregados, lo que contribuye a una mejor estructuración del suelo. De esta forma, los agregados son más estables y resistentes a la desintegración, mejorando la capacidad de retención de agua. Por otra parte, como resultado de la floculación y agregación de las partículas, aumentan los espacios capilares y se incrementa la aireación del suelo (Piccolo y Mbagwu, 1990).

La MO actúa como agente enlazante de los microagregados (50-250 μm), los cuales se forman por la unión de partículas elementales a través de agentes estructurantes, fundamentalmente sustancias húmicas (Elliot, 1986). Las asociaciones órgano-minerales le dan a los microagregados alta estabilidad frente al humedecimiento súbito. Además, pueden encontrarse en una variedad de escalas espaciales y han sido divididas en complejos órgano-minerales primarios y secundarios (Christensen, 1992). A través de la aplicación de enmiendas orgánicas se busca aumentar la cantidad de estas asociaciones, para así mejorar la estabilidad estructural del suelo.

La incorporación de rastrojo en camellones busca mejorar las características físicas (porosidad, estructura, capacidad de retención de agua, estabilidad de agregados, aireación y conductividad hidráulica) del suelo con el que fueron creados. Guerif (1989) investigó las características de compresión de mezclas de suelo-rastrojo y observó que la porosidad de éstas se incrementó con el aumento en el contenido de rastrojo en el momento de aplicar el estrés, además de apreciar que el rastrojo más descompuesto era menos efectivo en mejorar las condiciones físicas de la mezcla.

Los mecanismos que resultan en la unión de las partículas primarias del suelo en agregados estables varían con el material parental, el clima, la vegetación y las prácticas de manejo del suelo; no obstante persisten algunas incertidumbres en la dinámica de la MO sobre la macroagregación y microagregación bajo condiciones de manejo específico, requiriéndose investigación para entender mejor dichos mecanismos y las respuestas del suelo a las actividades humanas (Wei *et al.*, 2006).

Con el empleo conjunto de ácido húmico y rastrojos en camellones se busca aumentar la tasa de descomposición de estos últimos, para que así liberen particularmente polisacáridos. Debido al bajo contenido de nitrógeno (N) del rastrojo, la biodegradación de éste requiere de una fuente externa de N. Si la relación C/N es elevada ($C/N \geq 25$ ó contenidos de N $< 1,5\%$), los microorganismos deben extraer este elemento del suelo, produciéndose un agotamiento (hambre de nitrógeno) en perjuicio del cultivo. Si no existe suficiente N, se retardarán los procesos de humificación y posterior mineralización de los residuos; por este motivo, es indispensable considerar el aporte N necesario para cubrir el desequilibrio.

Es ampliamente aceptado que los productos de la degradación de la lignina y compuestos nitrogenados son los mayores constituyentes de la MO humificada y estable del suelo. La adición de rastrojos con alta concentración de lignina puede ser una opción de manejo, que conduciría al incremento del C del suelo (Paustian *et al.*, 1992), por lo que su complemento con ácidos húmicos de acción inmediata podría potenciar los efectos sobre las propiedades del suelo.

El objetivo general de esta memoria se orienta a evaluar la influencia que tiene la incorporación de rastrojo de trigo y/o ácido húmico sobre las propiedades físicas de un suelo intervenido en la forma de camellones y cultivado con mandarino.

Como objetivos específicos se plantea:

Determinar el efecto de los acondicionadores (rastrojo de trigo y/o ácido húmico) sobre las propiedades físico-mecánicas del camellón a distintas profundidades.

Generar una curva de consolidación para el depósito de suelo, con el fin de evaluar sus propiedades en el tiempo desde la plantación de mandarino.

MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se realizó en el predio Santa Rosa de Tabalí, Comuna de Ovalle, Provincia del Limarí, IV Región de Coquimbo (30° 40' 46'' S; 71° 24' 50'' O) durante la temporada 2010. Los análisis físicos se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

El sitio de estudio corresponde a un suelo con cultivo de mandarina (*Citrus reticulata*, var. *Clementina*, patrón *Citrango carrizo*) de un año, establecido sobre camellones (1,2 m de altura, 2,5 m de base y 1,5 m de corona) construidos en diciembre del 2009 con material suelo homogéneo perteneciente, según Aburto *et al.* (2008) a la Serie San Julián (Typic Haplotorrert), de texturas finas y pendiente menor al 3%.

La zona presenta un clima de estepa con nubosidad, que se caracteriza por frecuentes neblinas y alta humedad relativa. Las lluvias alcanzan los 119 mm al año concentradas principalmente en invierno, aunque también hay algunas en primavera. El mes más cálido (febrero) presenta 18,5°C y el mes más frío (julio) 11,6°C; es decir, se registra una oscilación térmica media de aproximadamente 7°C, moderada por la influencia marina (Sánchez, 2004).

Se utilizó como acondicionadores ácido húmico ([®]Pow Humus, WSG 85%) y rastrojo de trigo cultivado en el sitio del ensayo.

Tratamientos y diseño del experimento

El marco de plantación de los árboles es de 4 x 2 m entre hilera y sobre hilera, respectivamente. Los tratamientos se aplicaron en unidades experimentales (camellones) de 30 m de largo distribuidas en dos sitios colindantes. La alteración del sitio al construir los camellones homogeniza las propiedades del suelo, lo que permite una distribución semialeatoria de los tratamientos (Figura 1).

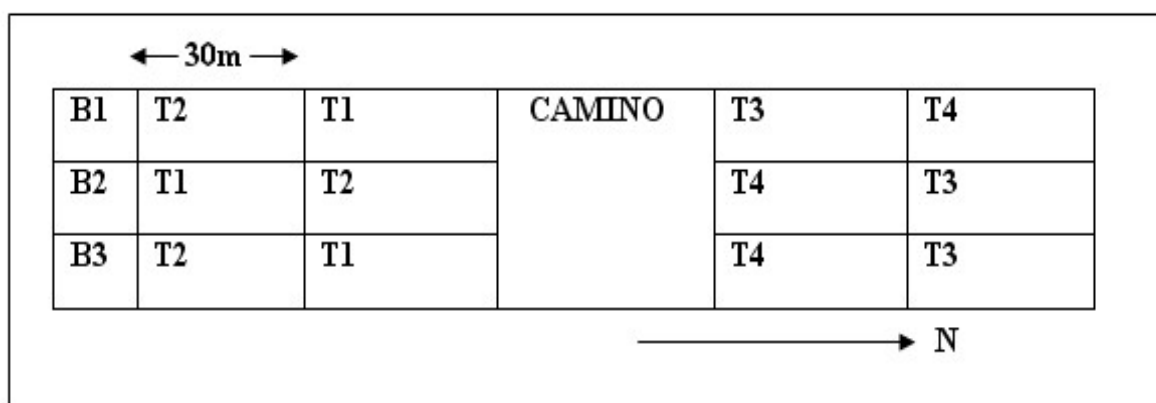


Figura 1. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales. Los bloques (Bi) corresponden a los camellones.

Los tratamientos aplicados a los camellones, con tres repeticiones, fueron los siguientes:

T1: Testigo, sin ningún tipo de enmienda.

T2: Aplicación de ácido húmico (20 kg ha⁻¹)

T3: Incorporación de rastrojo de trigo (5 Mg ha⁻¹)

T4: Incorporación de rastrojo de trigo y aplicación de ácido húmico (5 Mg ha⁻¹ y 20 Mg ha⁻¹)

Los tratamientos T3 y T4 fueron establecidos en un sitio que, previo a la construcción de los camellones, tuvo una siembra de trigo (año 2009) que fue cosechada cuyo residuo seco fue incluido dentro del volumen del camellón. El sector posee un sistema de riego por goteo de una línea, con goteros de 4 L h⁻¹ distanciados a 1 m sobre la línea.

El ácido húmico fue incorporado en Junio de 2010 a través de un recipiente aforado, que suministró un caudal siempre inferior a la velocidad de infiltración estabilizada, por lo cual no hubo pérdidas de éstos por escurrimiento superficial. Inmediatamente después de aplicado el ácido húmico se dio un riego para favorecer su distribución en el perfil. En Septiembre de 2010 se tomaron muestras de suelo a tres profundidades (0-10, 10-30, 40-60 cm) bajo el área de influencia del gotero, en las cuales se evaluaron los efectos de los tratamientos.

Propiedades de suelo evaluadas

Las variables físicas medidas fueron la densidad aparente (Da) con cilindros (Grossman y Reinsch, 2002), la densidad real (Dr) mediante el método del picnómetro (Flint y Flint, 2002) con muestras tamizadas a 2 mm; se evaluó la retención de agua (Dane y Hopmans, 2002) a 0, -6 y -30 kPa de tensión, en muestras inalteradas tomadas con cilindros (6 cm de diámetro y 5 cm de altura) y a -1500 kPa en muestras alteradas. A partir de la curva característica se derivó la distribución de poros por tamaño (Dane y Hopmans, 2002). El número poroso (NP= relación de vacío) se determinó utilizando los valores de densidad a través de la relación $NP = (Dr/Da) - 1$, que refleja el volumen de poros respecto al volumen de sólidos (cm³ cm⁻³) lo que permite hacer comparaciones directas entre los valores analizados (Hartge y Horn, 2009).

La estabilidad de macroagregados se evaluó mediante el método de tamizado en seco y húmedo (Hartge y Horn, 2009); éste utiliza un set de tamices (19,00; 9,52; 6,68; 4,75; 3,35 y 2,00 mm) para ver la distribución de los tamaños de agregados, evaluando la dispersión de éstos en agua. Así, el índice de agregación del suelo se determina a partir de la variación del diámetro en seco y húmedo, a una determinada fracción de la curva de frecuencia acumulada. Se emplearon 200 g de suelo no disturbado y en cada tamizaje (suelo seco y sumergido en agua) se determinó la masa de suelo resultante en cada rango de tamaño; luego se construyeron curvas con la fracción acumulada de las masas de cada tamizaje, calculando la estabilidad a través de la variación del diámetro de los agregados. Al respecto, se consideró un umbral de 80% de la fracción acumulada en base a masa para cada tamizado (VD₈₀):

$$VD_{80} = [(A - B) / A] \cdot 100$$

Donde A y B corresponden al diámetro de agregados (mm) al 80% de la fracción acumulada del tamizaje seco y sumergido en agua, respectivamente. Se verifica que

cuando se acumula un porcentaje determinado de la fracción de agregados, los valores de VD fluctúan entre 0 y 100 %. Así, un bajo valor de variación del diámetro entre tamizado seco y húmedo indicará mayor estabilidad al agua por parte de los agregados (Seguel *et al.*, 2003) (Hartge y Horn, 2009) no existiendo un valor crítico señalado en la literatura, pues depende de cada suelo.

También se determinó la variación del diámetro medio ponderado (VDM_p) como estimador de la estabilidad de macroagregados, empleando los datos generados a partir del tamizado en seco y en húmedo:

$$VDM_p = [\sum F_{ps} \cdot d_i] - [\sum F_{ph} \cdot d_i]$$

Donde:

F_{ps} = Fracción parcial de la masa del tamizaje en seco en el rango de tamaño i .

F_{ph} = Fracción parcial de la masa del tamizaje en agua en el rango de tamaño i .

d_i = diámetro medio de la fracción de cada tamiz (mm).

Un bajo valor de VDM_p , entre tamizado seco y húmedo, se interpreta como una mayor estabilidad al agua por parte de los agregados (Hartge y Horn, 2009).

La estabilidad de microagregados (1 a 2 mm) se determinó mediante el método de la relación de dispersión (Dermott, 1967, citado por Berryman *et al.*, 1982), que evalúa estabilidad y su variación en función del manejo; se basa en la metodología del hidrómetro de Bouyoucos, lo que lo hace sencillo de implementar. La descripción en detalle del método se encuentra en Seguel *et al.* (2003).

En terreno se evaluó la resistencia a la penetración (Septiembre de 2010) mediante un penetrómetro de punta cónica de 30° (Bradford, 1986), realizando seis mediciones por unidad experimental a profundidades de 0, 10, 20, 30, 40 y 50 cm al centro del camellón y bajo el gotero, un día después del riego.

Se realizaron pruebas de infiltrometría, empleando el método del cilindro infiltrómetro (Reynolds *et al.*, 2002). Para ello se utilizaron cilindros metálicos de 30 cm de diámetro y 40 cm de altura. El procedimiento de toma de mediciones consistió en montar un cilindro por cada repetición en la parte central del camellón, en la zona comprendida entre las dos plantas centrales de mandarina de cada unidad experimental, midiendo la altura de agua que infiltró en función del tiempo. El proceso tuvo una duración de 2,5 horas por cilindro para alcanzar la velocidad de infiltración estabilizada. Con los datos obtenidos se realizaron curvas de infiltración acumulada (IA), con cuyo valor estabilizado se estimó el flujo de agua cercano a saturación.

Finalmente, se determinó la consolidación confinada con drenaje libre (Kézdi, 1980) utilizando muestras de suelo equilibradas a -6 kPa colectadas en cilindros de 3 cm de altura y 10 cm de diámetro. Las muestras contenidas en estos cilindros fueron sometidas a presiones aditivas cada 15 minutos en 8 rangos, entre 30 y 400 kPa, con una posterior descarga a 100 y 0 kPa, se midió en cada punto la altura de la muestra con un medidor digital micrométrico.

Debido a que el camellón inicialmente no presenta asentamiento, la curva genera un comportamiento solo de consolidación primaria (Días Junior y Pierce, 1995), por lo que no es posible determinar la capacidad de soporte. En consecuencia, con los puntos de carga se determinó el módulo de plasticidad entre 150 y 400 kPa mientras que con los puntos de la descarga se determinó la recuperación elástica de las muestras; esta recuperación se obtiene del diferencial de altura respecto al diferencial de presión, entre la máxima presión ejercida y la descarga en presión cero. Cada ensayo de consolidación se realizó también con tres repeticiones.

Para cumplir con el segundo objetivo, se rellenaron cilindros de suelo (3 cm de altura y 10 cm de diámetro) con material suelo suelto pero agregado en unidades estructurales menores a 3 cm de diámetro, sin aplicar cargas externas extras. Los cilindros fueron saturados y posteriormente equilibrados a -6 kPa de tensión mátrica, realizando las pruebas de consolidación según se describió anteriormente. A partir de las pruebas de consolidación, se determinaron los módulos de plasticidad y elasticidad (Juárez y Rico, 2005), analizando por tratamiento las pérdidas de volumen según la magnitud de la carga aplicada. Esto permitió comparar los módulos obtenidos para las muestras del camellón (4 tratamientos y 3 profundidades), con un valor referencial dado por los módulos obtenidos de la curva de consolidación del material suelto.

Análisis estadístico

La unidad experimental correspondió al camellón con catorce árboles de mandarina y su diseño correspondió a bloques al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Se compararon los tratamientos a una misma profundidad mediante un ANDEVA para contrastar los resultados de las propiedades físicas del suelo; cuando fue necesario, se realizó una prueba de rango múltiple (LSD, $\alpha \leq 0,05$). Para el caso de las velocidades de infiltración estabilizada, se realizaron pruebas t de comparación de pendientes ($\alpha \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas generales

El Cuadro 1 presenta los resultados de densidad (real y aparente) con las cuales se calculó en número poroso (NP).

Cuadro 1. Valores medios de densidad y número poroso de los tratamientos, en función de la profundidad de un camellón cultivado con mandarina (*Citrus reticulata*, var. *Clementina*).

Tratamientos	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
Densidad real (Mg m⁻³)			
T1	2,72(±0,06)	2,78(±0,06)	2,71(±0,02)
T2	2,70(±0,08)	2,76(±0,05)	2,67(±0,08)
T3	2,62(±0,13)	2,68(±0,08)	2,67(±0,05)
T4	2,64(±0,10)	2,67(±0,07)	2,71(±0,09)
Densidad aparente (Mg m⁻³)			
T1	1,55(±0,16)	1,58(±0,07)	1,66(±0,18)a
T2	1,56(±0,07)	1,48(±0,06)	1,42(±0,06)b
T3	1,51(±0,06)	1,49(±0,20)	1,36(±0,12)b
T4	1,36(±0,08)	1,35(±0,17)	1,47(±0,08)ab
Número poroso (cm³ cm⁻³)			
T1	0,77(±0,19)	0,76(±0,04)	0,64(±0,23)
T2	0,73(±0,09)	0,87(±0,14)	0,88(±0,16)
T3	0,74(±0,11)	0,82(±0,36)	0,97(±0,16)
T4	0,94(±0,18)	1,00(±0,31)	0,84(±0,20)

Promedio ± DS. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas.

Como era de esperar, los valores de densidad real (Dr) no presentaron diferencias estadísticas significativas, encontrándose dentro de los rangos normales señalados por la literatura para suelos minerales (Brady y Weil, 1999). Sin embargo, los tratamientos con rastrojo de trigo (T3 y T4) en su composición presentaron una tendencia hacia valores más bajos dada la menor Dr de la materia orgánica (Burés, 1997). La tendencia que se observa es que T3 y T4 además presentaron mayor dispersión.

La densidad aparente (Da) es una propiedad altamente sensible al contenido de materia orgánica (MO) y al manejo, por lo que cualquier carga aplicada al suelo que supere su capacidad de soporte disminuirá el volumen de poros, produciendo un reordenamiento de las partículas del suelo e incrementando la Da (Horn *et al.*, 1994). Diversos autores (Kehr, 1983; Rethon, 2000; Caravaca *et al.*, 2001) señalan que la incorporación de MO disminuye la Da, debido al aumento en la estabilidad de los agregados y la macroporosidad.

En la primera profundidad los tratamientos T2 (ácido húmico) y T3 (rastrajo de trigo) no tuvieron efectos sobre esta propiedad, mostrando valores similares a los obtenidos en el testigo (T1). El tratamiento T4 (rastrajo de trigo y ácido húmico) fue el más efectivo a esta profundidad, debido a que el mayor aporte conjunto de MO estimuló la formación de una mayor cantidad de asociaciones MO-arcilla, incrementando la agregación del suelo y la formación de poros, disminuyendo así la Da (Oades, 1993).

En la segunda profundidad (10-30 cm) se produjo una ligera reducción en la Da respecto a la primera profundidad en los tratamientos T2 y T3. Esto se debería a la mayor población de raíces presentes en esta zona, producto del sistema radical pivotante del patrón (*Citrangé carrizo*) utilizado en el mandarino. Esta especie, al profundizar en el suelo, expande una mayor cantidad de raíces secundarias y, dado que tanto el ácido húmico como el rastrajo quedaron incorporados mayormente a más de 10 cm, promovieron la proliferación de raíces a partir de esta profundidad (Sotomayor, 1991). La menor Da del suelo como efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas se debe a que, por la menor densidad de estas últimas, se produce cierta dilución de la matriz del suelo y aumenta la estabilidad de agregados (Soane, 1990). En T1 en cambio, el aumento de la Da en profundidad se debería al proceso de asentamiento natural del suelo, producido por la masa de las capas superiores de éste, lo que va disminuyendo la proporción de macroporos. En los otros tratamientos no se verifica esto último, debido a que la MO incorporada mejora la agregación del suelo, resultando en una mayor porosidad total y una distribución de tamaño de poros más amplia y estable (Anderson *et al.*, 1990). No obstante, T4 siguió siendo el tratamiento más efectivo, debido a la mayor dosis de MO que se le incorpora.

En la tercera profundidad (30-60 cm) continuó la disminución de la Da en los tratamientos T2 y T3 debido a que el ácido húmico, al ser aplicado con el agua de riego, se movió con facilidad, incrementando su depositación en esta zona (Cortés, 2011); además, en T3 el rastrajo de trigo quedó en una alta proporción a esta profundidad, debido a que es la zona que se acerca a la superficie del suelo original, donde quedó un alto remanente del rastrajo. Piccolo y Mbagwu (1990) señalan que el aumento de la actividad biológica y la agregación producida por las enmiendas orgánicas depende de la cantidad aplicada, esto es, a mayor dosis mayor es el efecto sobre la Da.

Por otra parte, la profundidad de distribución del ácido húmico dependerá no sólo de la dosis, sino del método de aplicación; en el caso de este ensayo, junto con el riego, inmediatamente después de la aplicación del ácido húmico se registró una precipitación, lo que habría contribuido a una mejor distribución del producto en el perfil. Esta fue la única profundidad a la cual se detectaron diferencias estadísticamente significativas, debido a una mayor concentración de las enmiendas orgánicas, lo que potenció un mayor efecto de éstas. En el tratamiento T1 continuó el aumento de la Da, debido al proceso de asentamiento natural del suelo (Juárez y Rico, 2005), pero en T4 se produjo un aumento respecto a la medida sobreyacente, posiblemente debido a la absorción de parte del ácido húmico por parte del rastrajo aplicado; ello disminuyó la proporción de enmiendas orgánicas disponibles para interactuar con las partículas del suelo, afectando su modo de acción; al respecto, Tisdall y Oades (1982) señalan que los compuestos orgánicos solubles poseen un efecto inmediato sobre la estabilidad, aunque su persistencia es muy baja, en cambio los residuos de cosecha poseen un efecto al largo plazo, aunque con un impacto de menor magnitud. De todas formas, la interacción ácido húmico-residuo acelera la descomposición de este último, por lo que en futuros

muestreos se espera que este proceso se refleje en un mejoramiento superior de las propiedades físicas en profundidad (Beare *et al.*, 2002).

La porosidad, al determinar el movimiento de fluidos, de calor y de nutrientes del suelo, afecta la translocación como proceso de formación del suelo (Baver *et al.*, 1991). Por otra parte, procesos como la compactación conducen a una modificación del volumen de poros del suelo, lo que afecta en mayor o menor medida el desarrollo del cultivo (Sánchez-Girón, 1996). Por esta razón la determinación de la porosidad es importante, ya que permite conocer el grado de compactación sufrido por el suelo y así decidir qué cultivo establecer, o bien si existe la necesidad de realizar labores culturales.

En la primera profundidad (0-10 cm) la relación de vacíos obtenida en los tratamientos T2 y T3, fueron prácticamente iguales a los del testigo (T1), no evidenciándose efectos sobre los valores de número poroso (NP= relación de vacíos). Esto era esperable debido a que estos tratamientos no mostraron ningún efecto sobre la D_a , la cual se relaciona de manera inversa con la porosidad. El tratamiento T4 mostró ser el más efectivo en aumentar el NP, por el efecto sinérgico de las enmiendas.

En la segunda profundidad (10-30 cm) los tratamientos T2, T3 y T4 mostraron un incremento en NP respecto a la determinación en superficie. Como se ha mencionado, la mayor población de raíces promovida por las enmiendas orgánicas (Cortés, 2011) en esta zona contribuye a la formación de macroporos estables debido a los exudados que liberan y a su acción física, lo cual actúa en conjunto con las enmiendas orgánicas, mejorando la estabilidad de los agregados (Reid y Goss, 1981). En T1 se mantuvo el NP sin variaciones importantes.

Al respecto, Biolders *et al.* (2002) informan que a pesar de estar contruidos sobre suelo seco, la incorporación de residuos en camellones demostró ser un medio eficaz para su estabilización durante la estación seca, con efectos beneficiosos sobre las propiedades físicas del suelo a dos años de su incorporación; no obstante, el mejoramiento en la porosidad del suelo y la resistencia a la penetración resultó menor.

En la tercera profundidad (30-60 cm) se produjo un aumento del NP solo en T2 y T3, siendo este último el más efectivo. El tratamiento T4, debido a la mayor carga producida por el peso del suelo sobreyacente y a la reacción entre ácido húmico y rastrojo en profundidades menores, disminuyó su efectividad. Como era de esperar, T1 mantuvo la tendencia a disminuir NP, debido al proceso de asentamiento natural ya descrito.

El Cuadro 2 muestra la porosidad de drenaje rápido (PDR), de drenaje lento (PDL) y la de agua útil (PAU), determinadas a partir de la curva de retención de agua del suelo (Apéndice 1).

Cuadro 2. Distribución porcentual del tamaño de poros de los tratamientos, en función de la profundidad de un camellón cultivado con mandarino.

Tamaño poro (μm)	Tratamiento	Profundidad (cm)		
		0-10	10-30	30-50
PDR ($>50 \mu\text{m}$)	T1	11,3 ($\pm 2,15$)	8,6 ($\pm 3,78$)	5,8 ($\pm 0,95$)
	T2	7,8 ($\pm 1,91$)	11,1 ($\pm 7,32$)	7,5 ($\pm 4,12$)
	T3	9,5 ($\pm 2,29$)	9,2 ($\pm 2,05$)	10,9 ($\pm 5,06$)
	T4	13,8 ($\pm 3,22$)	12,9 ($\pm 1,67$)	8,0 ($\pm 4,22$)
PDL (50 a $>10 \mu\text{m}$)	T1	3,9 ($\pm 0,81$)	4,1 ($\pm 1,24$)	3,5 ($\pm 0,76$)
	T2	2,4 ($\pm 0,51$)	3,1 ($\pm 0,51$)	2,7 ($\pm 0,79$)
	T3	3,5 ($\pm 1,92$)	3,3 ($\pm 0,67$)	3,1 ($\pm 1,20$)
	T4	2,4 ($\pm 0,94$)	2,9 ($\pm 1,93$)	3,1 ($\pm 1,39$)
PAU (10 – 0,2 μm)	T1	12,2 ($\pm 2,59$)ab	14,3 ($\pm 2,93$)	16,7 ($\pm 6,99$)
	T2	7,2 ($\pm 5,97$)a	21,6 ($\pm 5,11$)	17,7 ($\pm 6,91$)
	T3	17,4 ($\pm 1,66$)b	13,0 ($\pm 5,40$)	16,5 ($\pm 8,38$)
	T4	14,9 ($\pm 3,19$)b	16,1 ($\pm 6,29$)	18,0 ($\pm 0,92$)

Promedio \pm DS. Letras indican diferencia estadísticamente significativa

Hillel (1980) precisa que para lograr un mayor conocimiento sobre la estructura del suelo y cómo ésta afecta el desarrollo de los cultivos, es necesario conocer no solo la porosidad total sino también la distribución del tamaño de poros, ya que condiciona el movimiento de fluidos en el perfil. Además, sería necesario determinar los cambios producidos por los cultivos sobre la distribución del tamaño de poros, considerando que Kolar *et al.* (2000) determinaron que la porosidad total no es modificada por los cultivos, pero sí la distribución de tamaño.

Los suelos de textura fina están sujetos a constantes procesos de contracción y expansión, lo que modifica la distribución y el tamaño de los poros (Horn *et al.*, 2007). Esta porosidad será estable en la medida que los puntos de contacto entre partículas sean estabilizados por agentes estructurantes. Es así como, en promedio y aunque sin diferencias estadísticamente significativas, para todos los tratamientos se observó una porosidad de drenaje rápido (PDR) mayor a la del T1 y lo contrario en la porosidad de drenaje lento (PDL), especialmente a profundidades mayores a los 10 cm (Cuadro 2)

En la primera profundidad (0-10 cm) T4 fue el único tratamiento capaz de incrementar la PDR, aunque sin diferencias significativas respecto al testigo (T1). Tanto T2 como T3 no mostraron efectos sobre la PDR a esta profundidad, mostrando valores incluso más bajos a los obtenidos en el T1, muy probablemente debido al tráfico en húmedo de un material que está en proceso de estabilización, lo que disminuye su porosidad gruesa.

En la segunda profundidad (10-30 cm) se observó un aumento de la PDR en comparación con el T1 para todos los tratamientos. Al respecto, Pikul y Allmaras (1986) señalan que la aplicación de enmiendas orgánicas produce un incremento de la macroporosidad (PDR+PDL) del suelo, como resultado de la mayor estabilidad promovida por éstas. Debido al tipo de sistema radical del patrón (pivotante) y a que el

ácido húmico estimuló un mayor desarrollo radical en esta zona, se afectó de manera beneficiosa la macroporosidad, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Cortés (2011) en paltos, para el mismo suelo de este estudio. El aumento en la PDR producido por el rastrojo se debe a su presencia física y a los derivados de su descomposición.

En la tercera profundidad se mantienen las diferencias de todos los tratamientos respecto al testigo (T1), aunque, con excepción del T3, se produce una disminución de éstas en relación a la evaluada entre 10-30 cm. Esto, con excepción del T3, se debería a la compactación producida a esta profundidad, resultante de la presión ejercida por la masa de suelo superior, lo que causa una disminución de los PDR en beneficio de los PDL (Seguel *et al.*, 2002a).

La PDL fue elevada para todas las profundidades, especialmente en T1 comparado con los tratamientos en que se aplicó ácido húmico (T2 y T4). Al respecto, Ellies *et al.* (1994) argumentan que el proceso de asentamiento natural del suelo incrementa la proporción de PDL, disminuyendo la conductividad hidráulica del suelo y la difusión de gases. Las enmiendas orgánicas aplicadas, especialmente los ácidos húmicos, aumentan la estabilidad de la estructura y su resiliencia, a través de la formación de enlaces con las partículas del suelo y el aumento de la actividad biológica de éste, reduciendo el impacto del asentamiento (Shepherd *et al.*, 2001).

Dado que el suelo retiene el agua por medio de la adsorción a las partículas sólidas, la intensidad de esta adsorción está dada por la superficie específica del suelo. Por lo tanto, la tensión con que el agua es adsorbida variará con la textura del suelo, su estructura, la presencia de materiales orgánicos y el contenido de agua (Pachepsky y Rawls, 1999). En general, la incorporación de enmiendas orgánicas aumenta la capacidad de retención de agua, debido a sus efectos sobre la estructura y a su capacidad de retención, dada su naturaleza coloidal (Mondaca, 2000).

Entre los 0-10 cm de profundidad, T3 y T4 fueron los más efectivos en aumentar la capacidad de retención de agua (Cuadro 2), con diferencias estadísticamente significativas respecto a T2 en PAU. El factor determinante fue la incorporación de rastrojo de trigo, que promovió una mayor capacidad de almacenamiento del agua en forma aprovechable por el cultivo a esta profundidad. Ello obedecería a la elevada retención de agua del rastrojo y a que promueve la formación de complejos órgano-minerales, generando porosidad en el rango aprovechable (Kher, 1983). El T2 presentó la menor humedad aprovechable, con valores inferiores a los del testigo (T1) que, como se mencionó, con el tráfico sobre un material en proceso de estabilización habría degradado físicamente al suelo. En los tratamientos en que se incorporó rastrojo de trigo (T3 y T4), la presencia física de este material en el camellón habría disminuido los efectos adversos a esta profundidad, tal como lo observo Zhang *et al.* (1997) al utilizar residuos para prevenir la compactación de suelos.

Entre los 10-30 cm el T2 mostró la mayor capacidad de retención de agua, aumentando de manera considerable respecto a la medida en superficie y a la efectuada en T1, aunque ésta no fue estadísticamente significativa. En general no se observan diferencias entre tratamientos en profundidad, siendo T3 y T4 muy homogéneos en su comportamiento. La ausencia de efectos con significancia estadística de las enmiendas sobre la retención de agua (PAU) se debería al corto tiempo del ensayo, requiriéndose

aplicaciones sucesivas en el largo plazo para lograr resultados efectivos; en ensayos de corto plazo, incluso en suelos de textura gruesa, las enmiendas orgánicas no generan una respuesta inmediata en relación a la retención de agua (Seguel *et al.*, 2011).

Entre los 30-60 cm de profundidad, los efectos de las enmiendas orgánicas sobre la humedad aprovechable disminuyen drásticamente, encontrándose leves diferencias respecto a la medida en T1. Esto se debió al proceso de asentamiento natural, el que al disminuir la porosidad responsable del almacenamiento de agua, provocó que todos los tratamientos tendieran hacia valores similares de retención.

Estabilidad de agregados

En cuanto a la persistencia del sistema poroso en el tiempo, las pruebas de estabilidad de agregados (EA) reflejan su comportamiento frente al agua cuando ocurren procesos de humedecimiento violento. El Cuadro 3 presenta los valores de EA, por tratamiento y profundidad, determinados con diversas metodologías.

Cuadro 3. Estabilidad de agregados medida por la variación del diámetro al 80% de la fracción acumulada en húmedo y seco (VD_{80}), variación del diámetro medio ponderado (VDM_p) y relación de dispersión (RD) en camellones plantados con mandarina.

Tratamiento	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
	VD_{80} (%)		
T1	93,6(± 1,80)	93,9(± 1,97)	94,1(± 1,76)
T2	77,2(±29,54)	62,5(±31,91)	68,9(±38,29)
T3	94,9(± 1,59)	93,2(± 1,58)	94,0(± 1,54)
T4	94,8(± 0,24)	94,3(± 0,46)	94,1(± 1,69)
	VDM_p (cm)		
T1	9,9(± 2,39)	11,1(± 2,67)	9,2(± 0,57)
T2	10,3(± 1,71)	9,9(± 3,56)	10,2(± 2,13)
T3	11,2(± 2,49)	11,6(± 1,28)	12,6(± 2,00)
T4	11,9(± 0,56)	10,9(± 1,05)	10,7(± 4,10)
	RD (%)		
T1	52,8(± 5,13)	63,2(±12,22)	62,9(± 1,56)
T2	44,0(±10,89)	58,3(±10,96)	46,0(±16,34)
T3	51,9(±12,95)	53,9(±20,81)	67,1(± 9,16)
T4	47,9(± 6,98)	50,2(± 6,56)	50,1(± 3,65)

Promedios (± DS). No se registraron diferencias estadísticas significativas. Valores menores indican mayor estabilidad.

La estabilidad de agregados, al estar directamente relacionada al contenido de materia orgánica (MO) y ésta a su resistencia a la humectación (hidrofobicidad), determina que suelos cuyo manejo mantiene la hidrofobicidad, presenten agregados estables a la dispersión y, por lo tanto, pequeñas variaciones del diámetro de los agregados (Ellies *et al.*, 1996).

El tratamiento T2 fue el único que mejoró la estabilidad de los macroagregados (VD_{80}) en todo el perfil de suelo, posiblemente porque el ácido húmico recubre las partículas de

suelo, dificultando su hinchamiento, aumentando la cohesión y manteniendo estable la estructura de los macroagregados (Chenu *et al.*, 2000). No obstante, esto no se materializó en diferencias estadísticas significativas, dada la alta variabilidad de los resultados. Los tratamientos restantes (T3 y T4) no mostraron efectos, obteniéndose valores similares a los del testigo (T1).

La estabilidad de agregados, evaluada mediante el VD_{80} mejoró a mayor profundidad en T2 (menor valor denota menor dispersión en agua), debido a la mayor depositación de ácido húmico y proporción de raíces descritas en estas zonas. Para los tratamientos restantes (T3 y T4) los valores fueron constantes, no evidenciándose diferencias respecto al T1. La posible absorción del ácido húmico por el rastrojo, producida en el tratamiento T4, no permitió que se produjeran los mejoramientos en la estabilidad de agregados observados en T2.

Para este estudio el VDM_p , como otro índice de estabilidad de macroagregados, no presentó sensibilidad entre tratamientos ni marcó tendencias en profundidad, a pesar de ser un índice matemático más exacto que el VD_{80} . En un estudio realizado en un suelo de textura fina cultivado con vid (Poblete, 2011) al que se hicieron aplicaciones de estiércol de cabra, la estabilidad evaluada con este índice aumentó en forma significativa al cabo de seis meses de la aplicación; ello obedecería al uso de un material más lábil, de rápida descomposición, además de aplicarse en una dosis mayor a la de este estudio.

En cuanto a la estabilidad de microagregados evaluada con la relación de dispersión (RD), en la primera profundidad (0-10 cm), los tratamientos T2 y T4 fueron los más eficaces en aumentarla; allí el ácido húmico fue el factor que determinó este mejoramiento debido a que su mayor reactividad lo hace capaz de incrementar la estabilidad de manera más rápida si se compara con el rastrojo de trigo, que debe descomponerse antes de actuar.

Sin embargo, en la segunda profundidad (10-30 cm) T3 mostró ser más efectivo que T2, probablemente porque en esta zona la tasa de descomposición del rastrojo fue mayor debido a una relación contenido de agua/temperatura más favorable (Schjonning *et al.*, 1999). El T4 fue el más efectivo de todos los tratamientos, mostrando la mayor diferencia en estabilidad de microagregados respecto al testigo, el cual presentó un incremento de la RD respecto a la muestra superficial.

En la tercera profundidad (30-60 cm) T3 disminuyó drásticamente sus efectos sobre la estabilidad de microagregados, alcanzando valores similares a los medidos en T1, lo que se atribuye a la disminución en la tasa de descomposición del rastrojo. Los tratamientos T2 y T4 fueron los más efectivos a esta profundidad, sin embargo este último fue menos efectivo, debido a la reacción ocurrida entre las enmiendas.

Velocidad de infiltración

La Figura 2 presenta la infiltración acumulada (cilindro infiltrómetro), que relaciona la cantidad de agua que ingresa a un suelo en función del tiempo (Dirkssen, 1999),

pudiendo considerarse su valor estabilizado muy cercano a la conductividad hidráulica saturada del suelo.

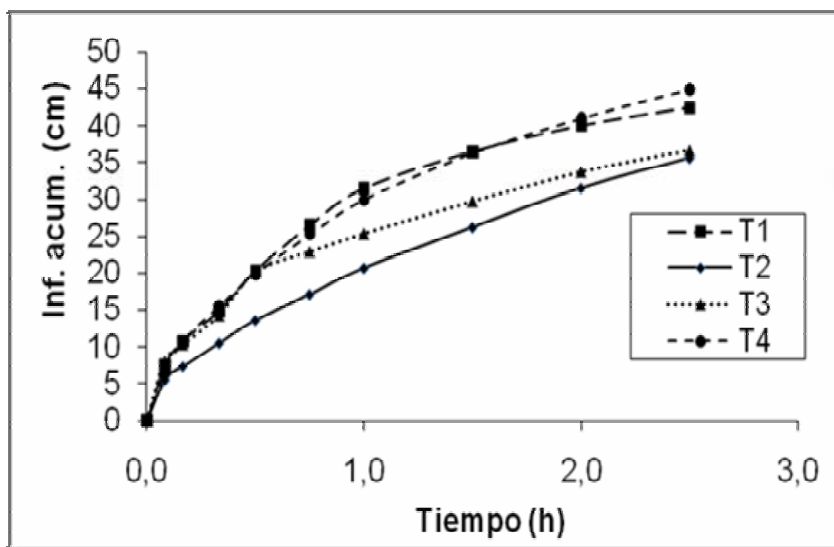


Figura 2. Infiltración acumulada (cm) de un camellón con mandarino, en función del tiempo para todos los tratamientos

Entre los factores fácilmente medibles u observables que determinan la tasa de infiltración, se puede mencionar el contenido inicial de agua del suelo (que se relaciona inversamente con la tasa de infiltración), la textura, la estructura del suelo, la condición de superficie (física y de cobertura), la cantidad de MO, la temperatura del suelo y la calidad del agua aplicada (Lado *et al.*, 2004).

Una mayor velocidad de infiltración es producto de la mayor cantidad y estabilidad de los macroporos, debido a la depositación de MO en las paredes de éstos; así, mientras menor sea el contenido de MO, mayor será el riesgo de colapso de la estructura al regar el suelo (Mitchell *et al.*, 1995), ya que se pierde el efecto de la hidrofobicidad generado por la MO (Ellies *et al.*, 1996).

Los tratamientos T2 y T4 resultaron con los mayores valores de velocidad de infiltración estabilizada (IE), equivalente a 10,02 y 9,91 cm h^{-1} , respectivamente. Aunque ambos contaron con ácido húmico, no presentaron diferencias estadísticas significativas con respecto a T1 y T3, con tasas similares de infiltración (7,29 y 7,58 cm h^{-1} , respectivamente). No se nota un efecto claro del rastrojo de trigo sobre esta propiedad, aún cuando la magnitud de la IE en T3 fue mayor a T1. El aumento en estabilidad de agregados observado en T2 y T4, generó una tasa de infiltración más alta, debido al aumento en la resistencia a la humectación, disminuyendo el hinchamiento de los agregados e impidiendo que la infiltración se vea limitada por este efecto. Estos resultados discrepan con los encontrados por Cortés (2011), quien señaló que aún cuando el ácido húmico promueve una alta proporción de porosidad gruesa, no se manifiesta en una mayor capacidad de trasmisión del agua.

Estabilidad mecánica del suelo

Resistencia a la penetración

La Figura 3 presenta los resultados de resistencia a la penetración (RP) que, aunque sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($\alpha \leq 0,05$), es un índice para evaluar las restricciones al crecimiento radical (Taylor y Brar, 1991) y permite conocer el comportamiento mecánico que expresa el suelo a la expansión lateral y al corte producido por un objeto introducido en éste (Medvedev, 2009).

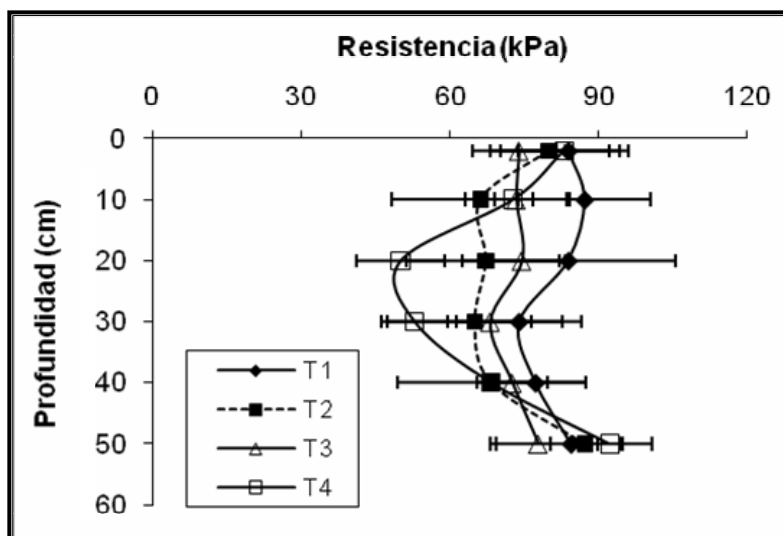


Figura 3. Resistencia a la penetración en función de la profundidad de un camellón con mandarino para los tratamientos evaluados.

Sin ser un rasgo particular del material sino más bien constituir la suma de efectos de diferentes características y propiedades, la RP evalúa un componente de la consistencia del suelo y expresa el grado de compactación de éste. Entre las propiedades de las que depende se incluye la densidad aparente, el contenido de agua y la estabilidad de agregados, las que son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura y de la composición tanto mineral como orgánica del suelo. Integrando estos factores, ninguno de los tratamientos presentó una resistencia excesiva o limitante al enraizamiento (Dexter, 2004), dado el corto tiempo transcurrido desde la construcción del camellón.

Entre los 0-10 cm de profundidad, el tratamiento T3 fue el que provocó una mayor disminución de la RP respecto al T1, pero dada la elevada variabilidad (Figura 3) no presentó significancia estadística. Los tratamientos T2 y T4 tampoco mostraron efectos sobre la RP a esta profundidad. La degradación producida por el tráfico disminuyó el efecto de las enmiendas orgánicas a esta profundidad, causando que los valores de RP obtenidos (principalmente en T2 y T4) fueran similares a los del testigo.

Entre los 10-30 cm de profundidad, los tratamientos T2, T3 y T4 intensificaron su acción, disminuyendo considerablemente la RP respecto a la medida en la profundidad sobreyacente, aunque sin diferencias estadísticas significativas. Como indican Pagliai y Antisari (1993), la incorporación de MO incrementa la porosidad gruesa (especialmente

PDR), en particular para T2 y T4, entre los 10-30 cm (Cuadro 2); ello se debería al ácido húmico aplicado, aunque en T4 la combinación de enmiendas fue más efectiva a esta profundidad. Este hecho es corroborado por Cortés (2011), quien encontró que las aplicaciones de ácido húmico estimulan el desarrollo del sistema radical en paltos, promoviendo la formación de macroporos, lo que disminuye la densidad aparente del suelo. En el tratamiento T3 la RP se mantiene estable y más baja respecto al testigo, aún cuando este efecto fue menor al exhibido por T2 y T4. En T1 se observaron los valores más altos a lo largo de todo el perfil, producto del tráfico en condiciones húmedas de un material no acondicionado, poco estable y en proceso de asentamiento natural (Seguel *et al.*, 2002b).

Entre los 30-60 cm los efectos de las enmiendas orgánicas empiezan a decaer, producto del incremento en la masa de la columna de suelo, que genera mayores cargas. Por esta razón todos los tratamientos en que se incorporó MO tienden a los mismos valores de RP (Figura 3), sin diferencias de importancia significativa respecto al testigo.

Consolidación

La Figura 4 presenta a modo de ejemplo tres curvas de consolidación, en las que se puede apreciar la pérdida de altura de una muestra confinada en un cilindro de 30 mm de altura, en función de la carga normal aplicada.

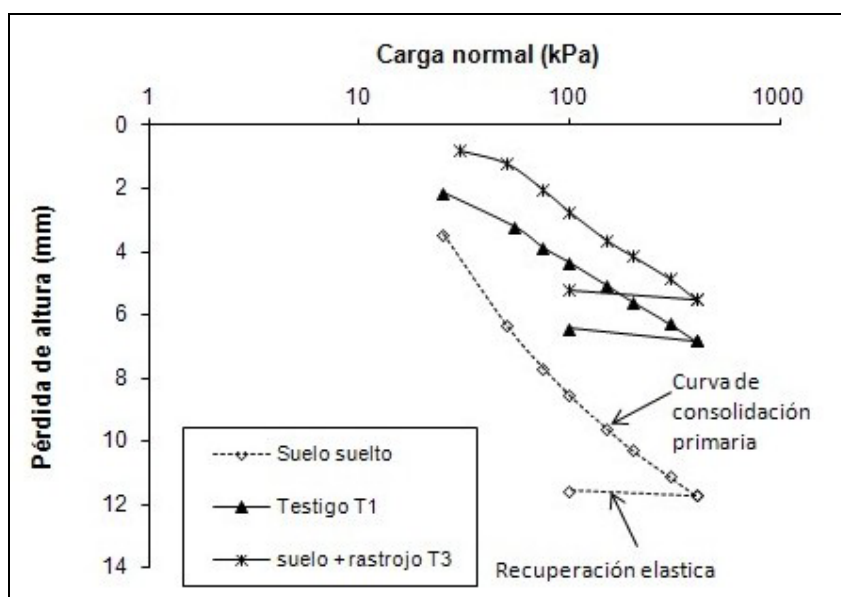


Figura 4. Valores medios de consolidación para el testigo del ensayo (T1), acondicionado con rastrojo (T3) y T1 soltado mecánicamente.

Como se ha indicado, el tráfico degrada físicamente el camellón, produciendo, entre otros efectos: incremento en la RP, disminución de la porosidad total, aumento de los poros finos en desmedro de los gruesos y disminución de la conductividad hidráulica y de la permeabilidad al aire. Ellies *et al.* (1994) concluyen que el exceso de tráfico afecta negativamente la capacidad productiva del suelo. Horn (2002) destaca que la resistencia del suelo, frente a esta compresibilidad mecánica, va a depender de la distribución del tamaño de partículas, el contenido de MO, la densidad aparente, la distribución por

tamaño de poros, la continuidad de éstos y el contenido de agua. Sin embargo, al cabo de 9 meses de contruidos, los camellones no se han asentado lo suficiente como para manifestar una RP excesiva, manteniéndose siempre valores menores a 100 kPa medidos con un contenido de agua a capacidad de campo (Figura 3).

Como se aprecia en la Figura 4, el suelo suelto (condición del camellón al tiempo cero) sufre una consolidación de mayor magnitud a la del testigo (T1) y a la del T3. Esto se debería a que su estructura fue totalmente alterada al realizar la mezcla de suelo, aumentando la consolidación producida por la aplicación de cargas crecientes y disminuyendo su resiliencia (recuperacion elastica). En el caso de T1, que también comenzó siendo un material suelto, ha tenido un periodo de asentamiento de 9 meses que le ha permitido generar algún grado de estructura, dando como resultado una menor consolidación y una mayor resiliencia si se compara con el suelo suelto. El T3 fue incluido en la Figura 4 para remarcar el efecto de la MO sobre la consolidación del suelo; ésta, al recubrir las partículas sólidas, disminuye su compresibilidad y aumenta su resiliencia (Horn, 1993), permitiendo incluso generar una curvatura de tipo convexa que denota la generación de capacidad de soporte. A partir de la curva de consolidación primaria fue posible calcular el módulo de deformación plástica, mientras que con la curva de recuperación se pudo calcular el módulo de la recuperación elástica.

Al comparar los valores de deformación plástica y recuperación elástica del suelo suelto con los obtenidos en los tratamientos realizados, se encontraron diferencias estadísticas significativas. Esto se debe a la falta de estructura del suelo suelto, lo que incrementa la consolidación causada por las cargas aplicadas (Horn *et al.*, 2002).

El Cuadro 4 presenta los valores de ambos parámetros, incluidos los del material suelto, obtenidos a través de pruebas de consolidación en condiciones de drenaje libre.

Cuadro 4. Valores de plasticidad y elasticidad del suelo de un camellón con mandarino, derivadas de pruebas de consolidación.

Tratamiento	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
Deformación plástica [cm Pa⁻¹]			
T1	8,27(±1,75)	7,83(±1,66)	7,25(±0,36)
T2	10,21(±0,74)	9,43(±1,50)	7,72(±0,78)
T3	8,04(±0,62)	8,55(±1,88)	7,76(±1,02)
T4	8,00(±0,87)	8,96(±1,43)	7,91(±0,50)
Suelo suelto	12,95(±0,30)		
Recuperación elástica [cm Pa⁻¹]			
T1	1,15(±0,19)	1,53(±0,36)	1,12(±0,21)
T2	0,81(±0,21)	1,03(±0,32)	1,31(±0,15)
T3	1,14(±0,21)	1,49(±0,17)	1,23(±0,42)
T4	1,23(±0,13)	1,19(±0,24)	1,18± (0,22)
Suelo suelto	0,44(±0,21)		

Promedio ± DS. No se registraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas con el suelo suelto.

Entre los 0-10 cm de profundidad, el tratamiento que sufrió la mayor deformación plástica fue T2, siendo a la vez el de menor recuperación elástica. El ácido húmico, pese a aumentar la estabilidad de los agregados del suelo, no fue capaz de mejorar su comportamiento mecánico, esto se contradice con lo señalado por Ball *et al.* (2000) quienes describen que la MO fácilmente oxidable, como el ácido húmico, tiene un mayor efecto en el comportamiento mecánico del suelo que la MO total al disminuir los efectos de la compactación. Por otra parte, la resistencia mecánica también se ve afectada por la relación C/N de la enmienda orgánica (Hazma y Anderson, 2005); el rastrojo de trigo, con una alta relación C/N, aún no ha logrado su total descomposición, por lo que sus efectos sobre la estabilidad mecánica del suelo no han llegado a su máxima expresión. Los tratamientos T3 y T4 no exhibieron efectos a esta profundidad, comportándose de manera similar al T1.

En la segunda profundidad (10-30 cm) todos los tratamientos tendieron hacia valores similares de deformación plástica y recuperación elástica, observándose un leve aumento promedio de éstas, respecto a la profundidad sobreyacente. Debido a que se trata de camellones, la respuesta de los tratamientos frente a cargas son similares, ya que la estructura de éstos se encuentra en proceso de formación y estabilización, razón por la cual las enmiendas orgánicas aplicadas no fueron capaces de mejorar el comportamiento mecánico del suelo. El mejoramiento observado, con respecto al suelo suelto, sería un resultado dependiente de los ciclos de humectación y secado (Semmel *et al.*, 1992). Estos resultados concuerdan con los de Cortés (2011), quien señaló que las enmiendas orgánicas aplicadas sobre camellones no presentaron efectos sobre estas variables.

Para la tercera profundidad (30-60 cm) los valores alcanzados por todos los tratamientos, tanto para deformación como para recuperación, fueron prácticamente iguales debido a la presión ejercida por la columna de suelo superior; ella tiene efectos similares pero menos intensos que los producidos por un manejo inadecuado, tendiendo a homogenizar la respuesta frente a las pruebas mecánicas (Ellies y Hartge, 1990).

En definitiva, todas las condiciones (tratamientos y profundidades) presentaron un menor comportamiento plástico y una mayor recuperación elástica, lo que resulta favorable desde el punto de vista de funcionamiento del suelo. Aún considerando la importancia de los ciclos de humectación y secado como agente de estructuración (Semmel *et al.*, 1992), se hace necesario continuar con la búsqueda de enmiendas orgánicas que aceleren la recuperación y estabilidad mecánica del suelo.

CONCLUSIONES

La incorporación de enmiendas orgánicas tuvo efectos benéficos sobre algunas de las propiedades físicas del camellón plantado con mandarino. En el caso particular del ácido húmico, el efecto se expresó en una disminución tanto de su densidad aparente (Da) como de su resistencia a la penetración (RP) y en un aumento de la estabilidad de agregados, la porosidad gruesa y la infiltración acumulada.

El rastrojo de trigo fue menos efectivo que los ácidos húmicos, en cuanto a su aporte como acondicionador físico, lo que responde a un mayor tiempo requerido para descomponerse y así efectuar esta acción. La mezcla ácido húmico-rastrojo fue más efectiva en mejorar las propiedades físicas sólo hasta los 30 cm de profundidad del camellón; a mayores profundidades, debido a la disminución en la tasa de descomposición del rastrojo y a que éste absorbió parte del ácido húmico, su efectividad fue superada por la aplicación de ácido húmico individual.

El método de aplicación de los acondicionadores determinó la profundidad a la que éstos fueron más efectivos, destacando el ácido húmico con un efecto en profundidad al ser aplicado junto al agua de riego. Por otra parte, el rastrojo de trigo quedó incorporado en mayor proporción a profundidades bajo los 10 cm, expresando sus mayores efectos a partir de esta profundidad. Sin embargo el escaso tiempo transcurrido entre su aplicación y la toma de muestras no permitió que sus efectos positivos se tradujeran en diferencias de significancia estadística.

La consolidación de los materiales, depende de los ciclos de humectación y secado generándose un arreglo de las partículas de suelo indistintamente de la enmienda aplicada, lo que permite obtener un asentamiento y una estabilidad mecánica en forma natural en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aburto, F., C. Hernández, M. Pfeiffer, M. Casanova and W. Luzio. 2008. Soil: A work of art of nature. Northern field guide between 30 S° and 33 S°. Casanova M. and Luzio W. (Eds.). The International Conference and Field Workshop on Soil Classification. Ovalle, Chile. Noviembre 2008. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 94 p.
- Anderson, S.H., C.J. Gantzer and J.R. Brown. 1990. Soil physical properties after 100 years of continuous cultivation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 45:117-121.
- Ball, B.C., D.J. Campbell and E.A. Hunter. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil and Tillage Research*, 57: 83–91.
- Baumgartl T. and R. Horn. 1991. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 19: 203-213.
- Baver, L.D., W.H. Gardner and W.R. Gardner. 1991. *Física de Suelos*. Limusa. México. 529 p.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, 764 p.
- Beare, M., P. Wilson, P. Fraser and R. Butler. 2002. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release, and crop production. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 848-856.
- Berryman, C., D. Davies, C. Evans, M. Harrod, A. Hughes, R. Skinner, R. Swain and D. Soane. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. Formerly Advisory Paper N°18. Reference Book 441. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Swedish. 116 p.
- Biielders C.L., K. Michels and A. Bationo. 2002. On-farm evaluation of ridging and residue management options in a Sahelian millet-cowpea intercrop. 1. Soil quality changes. *Soil Use and Management*, 18: 216-222.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability. pp: 468-471 *In*: Klute, A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph N° 9* (2nd ed.).
- Brady, N. and R. Weil. 1999. *The Nature and Properties of Soils*. 12th ed. New Jersey. Prentice Hall, 881 p.
- Bravo, J. 2009. *Dinámica productiva y comercial*. Oficina de Estudios y Planificación Agraria (ODEPA). Documento electrónico disponible en <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/2231.pdf> (visitado 10 abril del 2010).
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. 341 p.
- Caravaca, F., A. Lax and J. Albaladejo. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1235-1238.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais and D. Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability: *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1479–1486.
- Christensen, B.T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances Soil Science*, 20: 2-38.

- Cortés, A. 2011. Estabilización de camellones con paltos vía enmiendas orgánicas y cultivos de cobertera. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 44 p.
- Dane, J.H. and J.W. Hopmans. 2002. Soil water retention and storage. pp: 671-674. *In*: Dane, J. H. and G.C. Topp (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America. Book Series Nr 5. 1692 p.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201-214.
- Días Junior, M.S. and F.J. Pierce. 1995. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8:139-151.
- Dirkssen, C. 1999. *Soil physics measurements.* GeoEcology paperback. Reiskirchen, Germany. 154 p.
- Dörner, J.M. and R. Horn. 2006. Anisotropy of pore functions in structured stagnic luvisols in the weichselian moraine region in Northern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169: 213-220.
- Ellies, A., C. Ramírez y H. Figueroa. 1994. Cambios morfológicos estacionales del espacio poroso en un Hapludand. *Agro Sur*, 22(1): 23-32.
- Ellies A., R. Grez and C. Ramírez. 1996. Efecto de la materia orgánica sobre la capacidad de humectación y las propiedades estructurales en algunos suelos de la zona Centro Sur de Chile. *Agro Sur*, 24(1): 48-58.
- Ellies, A. und K.H. Hartge. 1990. Erfassung der Gefügeveränderung infolge der Inkulturnahme von Sekundärurwald in Südchile durch Multivarianzanalysen, *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 31: 380-388.
- Elliot E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50 (3): 627-633.
- Flint., A.L. and L. E. Flint. 2002. Particle density. pp: 229-240. *In*: Dane, J. H. and G.C. Topp (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America. Book Series Nr 5. 1692 p.
- Gregory, P.J. 2006. *Plant roots: their growth, activity and interaction with soils.* Blackwell Publishing Ltd. 318 p.
- Grossman, R.B. and T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. pp: 201-228. *In*: Dane, J. H. and G.C. Topp (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America. Book Series Nr 5. 1692 p.
- Guerif, J.1989. Effects of changing straw disposal on soil physical properties. pp: 117-126. *In*: Baeumer, K. and Ehlers, W (eds.). *Energy saving by reduced soil tillage.* Report EUR 11258 CEE. 250 p.
- Hakansson, I. and R. Reeder. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29: 277-304.
- Hartge, K.H. und R. Horn 1991. *Einführung in die Bodenphysik.* Ferdinand Enke, Stuttgart 2ª ed. 287 p.
- Hartge, K.H. und R. Horn. 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung.* 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178 p.
- Hazma, M.A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82: 121-145.
- Hillel, D. 1980. *Applications of Soil Physics.* Academic Press, N.Y. 385 p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics.* Academic Press, San Diego, CA. 771 p.

- Horn, R. 1993. Mechanical properties of structured unsaturated soils. *Soil Technology*, 6: 47-75.
- 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. 2002. Stress strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. 17th World Congress of Soil Science, 14-21 August 2002, Bangkok, Thailand.
- Horn, R., C. Simota, H. Fleige, A. Dexter, K. Rajkai and D. de la Rosa. 2002. Prediction of soil strength of arable soils and stress dependent changes in ecological properties based on maps. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 165: 235–240.
- Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116: 77-88.
- Horn, R. and A. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research*, 82: 5-14.
- Horn, R., K.H. Hartge, J. Bachmann and M.B. Kirkham. 2007. Mechanical stresses in soils assessed from bulk–density and penetration–resistance data sets. *Soil Science Society of America Journal*, 71: 1455–1459.
- Juárez, E. y A. Rico. 2005. *Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Ed. Limusa, Noriega Editores. México. 642 p.
- Keeling, A. 1994. Germination and growth of plants in media containing unstable refuse derived compost. *Soil Biology and Biochemistry*, 26: 767-772
- Kehr, E. 1983. Efecto de diferentes enmiendas sobre la evolución de las propiedades físico-hídricas de un suelo arcilloso. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Austral, Facultad de Ciencias Agrarias, Valdivia, Chile. 67 p.
- Kézdi, A. 1980. *Handbook of Soil Mechanics. Volume 2. Soil Testing*. Elsevier. Amsterdam. Netherlands. 258 p.
- Kolar, M., C. Venialgo, N. Gutierrez, E. Moro y J. Oleszczuk. 2000. Influencia de diferentes cultivos sobre la porosidad de un suelo de la serie Independencia. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Secretaría General de Ciencia y Técnica-UNNE. (Serie en CD-ROM). AGRARIAS: 09*.
- Lado, M., A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, soil formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 935-942.
- Lal, R. 1988. *Soil Erosion Research Methods*. Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society. 244 p.
- Marshall, T. and J. Holmes. 1988. *Soil Physics. Second edition*. Cambridge University Press, Cambridge, England. 374 p.
- Medvedev, V.V. 2009. Soil penetration resistance and penetrometers in studies of tillage technologies. *Eurasian Soil Science*, 42(3): 299–309.
- Mitchell, A.R., T.R. Ellsworth, and B.D. Meek. 1995. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26: 2655-2666.
- Mondaca, J.P. 2000. Curva de retención de humedad como indicador de calidad de suelo. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Chillán, Chile. 40 p.
- Müller E., H. Wildhagen, M. Quintern, J. Heß, F. Wichern and R.G. Joergensen. 2009. Spatial patterns of soil biological and physical properties in a ridge tilled and a ploughed Luvisol. *Soil and Tillage Research*, 105: 88–95.

- Oades J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56: 377-400.
- Ortiz, J.M. 2002. Botany: taxonomy, morphology and physiology of fruits, leaves and flowers. pp: 27- 46. *In: Citrus: The genus Citrus*. Dugo G. and Giacomo A. (Eds.). Taylor & Francis. 641 p.
- Pachepsky, Y. and A. Rawls. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer function as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 1748-1757.
- Pagliai, M and V. Antisari. 1993. Influence of waste organic matter on soil micro and macrostructure. *Bioresource Technology*, 43: 205-213.
- Paustian, K., W.J. Parton and J. Persson. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long term plots. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 476-488.
- Piccolo, A. and J.S.C. Mbagwu. 1990. Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates. *Soil Science*, 147: 47-54.
- Pikul J.L. Jr. and R.R. Allmaras. 1986. Physical and chemical properties of a Haploxeroll after fifty years of residue management. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 214-219.
- Poblete, L. 2011. Modificación de las propiedades físicas de un suelo de textura fina de la III Región cultivado con vid, mediante la incorporación de materia orgánica en la sobre hilera. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 47 p.
- Razeto, B. y T. Fichet. 1996. Cultivo de Palto y Perspectivas de Mercado. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 123 p.
- Reid J.B. and M.J. Goss. 1981. Effect of living roots of different plant species on aggregate stability of two arable soils. *Soil Science Society of America Journal*, 32: 521-541.
- Reynolds, W., E. Elrick, E. Youngs, H. Booltink and J. Bouma. 2002. Saturated and field saturated water flow parameters. pp: 797-816. *In: Dane J. and G. Topp (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. ASA and SSSA, Madison, WI. 1.692 p.
- Rothon, F.E., 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 700-709.
- Sagredo C. 2005. Metodología para evaluar la estabilidad de camellones. Memoria de Título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos. 18 p.
- Sánchez-Girón, V. 1996. Dinámica y mecánica de suelos. Ediciones Agrotécnicas, Madrid. 426 p.
- Sánchez, H. 2004. Climatología de Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Revista N° 13. 5 p.
- Schjonning, P., I.K. Thomsen, J.P. Moberg, J. de Jonge, K. Kristensen and B.T. Christensen. 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils, I: Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*, 80: 177-198.
- Seguel, O., A. Ellies, R. MacDonald y C. Ramírez. 2002a. Capacidad de soporte y resistencia al corte en suelos sometidos a distinto uso. *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*, 18: 47-50.
- Seguel, O., A. Ellies, R. MacDonald y C. Ramírez. 2002b. Propiedades mecánicas en suelos sometidos a distintos usos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 2 (2): 56-61.

- 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*, 63(3): 287-297.
- Seguel, O., C. Baginsky, A. Contreras, J. Covarrubias, C. González and M. Sandoval. 2011. Changes in physical properties of a Typic Haplocambid by annual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(1): 1-15.
- Semmel, H., R. Horn, A.R. Dexter and E.D. Schulze. 1992 . The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology*, 3: 113-129.
- Shepherd, T.G., S. Saggar, R.H. Newman, C.W. Ross, and J.L. Dando. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fraction in New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research*, 39: 465–489.
- Soane, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, 16:179-201.
- Sotomayor, C. 1991. Conozcamos mejor: Los frutales cítricos. *Chile Agrícola*, 16(165): 34-37.
- Srivastava A.K. and Shyam S. 2007. Analysis of citrus orchard efficiency in relation to soil properties. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 2077–2090.
- Taylor, H.M. and G.S. Brar. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, 19: 111-119.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33:141-163.
- Wei C., M. Gao, J. Shao, D. Xie and G. Pan. 2006. Soil aggregate and its response to land management practices. *China Particology*, 4(5): 211-219.
- Zhang, H., Hartge, K.H. and Ringe, H. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Science Society of America Journal*, 61:239-245.

APÉNDICE 1

Curvas de retención de agua, a distintas tensiones para los 4 tratamientos a tres profundidades

