

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

**Memoria de Título**

**EVALUACIÓN DE USO DEL MINIDISCO INFILTRÓMETRO PARA  
LA DETERMINACIÓN *IN SITU* DE LA HIDROFOBIA DE SUELOS**

**DANIEL ANDRÉS VARGAS CAMPOS**

**SANTIAGO – CHILE**  
**2014**

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

**Memoria de Título**

**EVALUACIÓN DE USO DEL MINIDISCO INFILTRÓMETRO PARA  
LA DETERMINACIÓN *IN SITU* DE LA HIDROFOBIA DE SUELOS**

**EVALUATION OF MINIDISK INFILTRMETER DEVICE FOR  
*ON-SITE* DETERMINATION OF THE SOIL HYDROPHOBIA**

**DANIEL ANDRÉS VARGAS CAMPOS**

**SANTIAGO – CHILE**  
**2014**

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

**EVALUACIÓN DE USO DEL MINIDISCO INFILTRÓMETRO PARA  
LA DETERMINACIÓN *IN SITU* DE LA HIDROFOBIA DE SUELOS**

**Memoria para optar al Título Profesional de:  
Ingeniero Agrónomo**

**DANIEL ANDRÉS VARGAS CAMPOS**

<b>Profesor Guía</b>	<b>Calificaciones</b>
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Cristian Kremer F. Ingeniero Agrónomo, Ph D.	7,0
Sra. Marcela Esterio G. Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc.	6,6

**SANTIAGO – CHILE**  
**2014**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
Palabras clave .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
Key words .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
Objetivos .....	6
Objetivo general .....	6
Objetivos específicos .....	6
<b>MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	7
Ubicación del estudio .....	7
Materiales .....	8
Metodología.....	8
Propiedades evaluadas .....	9
Repelencia al agua .....	11
Diseño experimental y análisis estadístico .....	13
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	14
Propiedades generales de los suelos .....	14
Textura.....	14
Densidad aparente, densidad real y materia orgánica .....	16
Porosidad .....	19
Distribución de tamaño de poros .....	20
Propiedades hidráulicas .....	22
Velocidad de infiltración .....	22
Análisis de repelencia al agua.....	26
Índice de repelencia R en laboratorio.....	28
Índice de repelencia R <i>in situ</i> .....	30
Efecto de la materia orgánica sobre el índice de repelencia (R) .....	32

Correlación entre índice de repelencia (R) <i>in situ</i> y el índice de repelencia (R) de laboratorio .....	35
<b>CONCLUSIONES</b> .....	38
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	39
<b>APÉNDICES</b> .....	46
<b>ANEXOS</b> .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Cuadro 1. Resumen de granulometría superficial (0-10 cm) para cada Serie de suelo .....	14
Cuadro 2. Densidad aparente, densidad real y porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial (0-10 cm). .....	17
Cuadro 3. Distribución volumétrica (%) del tamaño de poros (0-10 cm) de los tratamientos... ..	20
Cuadro 4. Velocidad de infiltración (VI) (cm/h) evaluadas sobre condiciones de suelo húmedo y suelo seco para ambas Series de suelo .....	24
Cuadro 5. Índice de repelencia (R, adimensional) obtenidos por el método de laboratorio (Tillman <i>et al.</i> , 1989) en muestras equilibradas a -33 kPa y secas al aire.....	28
Cuadro 6. Valores del índice de repelencia (R) obtenidos por el uso del minidisco infiltrómetro en terreno en dos condiciones de humedad de suelo y tres tensiones de suministro de los líquidos infiltrantes.....	30
Figura 1. Zonas del estudio. Estación Experimental Agronómica Germán Greve Silva Maipú, Santiago. ....	7
Figura 2. Dispositivo desarrollado por Leeds-Harrison <i>et al.</i> (1994).....	11
Figura 3. Diagrama del minidisco infiltrómetro Decagon Device modelo S .....	13
Figura 4. Fracción acumulada <i>versus</i> diámetro de partículas para las Series RLV (arriba) y MPC (abajo).. ..	16
Figura 5. Porosidad (%) para cada profundidad en las Series RLV (izquierda) y MPC (derecha) .....	19
Figura 6. Infiltración acumulada (cm) en función del tiempo (min) para el tratamiento “Arado” (T0) en condición de suelo seco dentro de la Serie MPC.....	22
Figura 7. Recta de sortividad (terreno) de la Serie RLV, en condición de suelo húmedo y tratamiento nativo.....	27
Figura 8. Efecto de la materia orgánica (MO) en el índice de repelencia (R) para ambas Series de suelo en condición de suelo húmedo (-33 kPa) y distintas tensiones...	34
Figura 9. Relación entre el índice de repelencia (R) medido en laboratorio y en campo. -1, -3 y -5 hPa corresponden a tensiones de suministro de los líquidos infiltrantes (agua y etanol) en el método de campo .....	36

## RESUMEN

Los métodos desarrollados para la determinación de la hidrofobia de suelo necesitan disgregar las muestras, alterando así la condición natural en la que se encuentran. El presente estudio planteó el uso del minidisco infiltrómetro como una alternativa para evaluar hidrofobia en terreno a través del índice de repelencia R, correlacionándolo con el método de laboratorio. Las mediciones se realizaron en suelos pertenecientes a las Series Mapocho (MPC, Fluventic Haploxeroll) y Rinconada Lo Vial (RLV, Typic Xerochrept), definiendo tres tratamientos: T0: arado, T1: arado más ácido húmico y T2: nativo. De cada situación se extrajeron muestras (0-10 cm) para la evaluación de textura, densidad aparente, materia orgánica, porosidad y distribución de tamaño de poros; las mediciones del índice de repelencia, tanto en laboratorio como en campo, se realizaron en condiciones de suelo húmedo (-33 kPa) y seco (-3000 kPa); la medición *in situ* se realizó además bajo distintas tensiones de suministro (-1, -3 y -5 hPa) de los líquidos infiltrantes (agua y etanol).

Los contenidos de arena promedio variaron entre 50% para la Serie MPC y 65% para la Serie RLV, con una clara diferenciación de la densidad aparente y de la velocidad de infiltración entre los sitios nativos con respecto a los arados, aunque sin diferencias significativas en la distribución de tamaño de poros. Se determinó un incremento del contenido de materia orgánica en función de los tratamientos ( $T0 < T1 < T2$ ), lo que generó un aumento de R determinado en campo, especialmente en condición de suelo húmedo (-33 kPa) y tensiones de suministro de líquidos de -1 hPa. En condiciones de suelo seco tiende a acentuarse la repelencia al agua en ambos métodos, presentándose de forma más clara en las mediciones de laboratorio. Finalmente, el índice R de campo correlacionó con el de laboratorio en forma lineal en la Serie RLV con tensiones de suministro de líquidos de -1 y -3 hPa, indistintamente de la condición de humedad del suelo, siendo más sensible el método de laboratorio. A pesar de esto, la variabilidad de los resultados es alta, debiéndose aumentar el número de repeticiones para una adecuada caracterización.

**Palabras clave:** Repelencia al agua, índice R, materia orgánica del suelo, propiedades físicas de suelo.

## ABSTRACT

The methods developed for determining the soil hydrophobia disturb the soil by sampling, altering the natural condition of the aggregates. This study proposed the use of minidisk infiltrometer as an alternative to evaluate on-site hydrophobia through the R repellency index, correlating with the laboratory method. The measurements were performed on soils belonging to the Mapocho series (MPC Fluventic Haploxeroll) and Rinconada Lo Vial series (RLV, Typic Xerochrept), defining three treatments: T0: plow, T1: plow plus humic acid, and T2: native. In each situation samples (0-10 cm) were extracted for the evaluation of texture, bulk density, organic matter, porosity and pore size distribution. The measurements of repellency in both laboratory and *on-site* were performed in wet soil conditions (-30 kPa) and dry soil conditions (-3000 kPa). Also, the on-site measurement was performed under different supply pressure (-1, -3 and -5 hPa) of the infiltrating liquids (water and ethanol).

The average content of sand ranged from 50% to the MPC series and 65% to the RLV series, with a clear differentiation of the bulk density and the infiltration rate between the native sites with respect to the plowed sites, although without significant differences in pore size distribution. An increase in the content of organic matter was determined in terms of the treatments ( $T0 < T1 < T2$ ), which resulted in an increase of R determined on-site, especially in wet soil conditions (-33 kPa) and liquid supply pressure of -1 hPa. In dry soil conditions water repellency in both methods tends to increase, especially in laboratory measurements. Finally, the field R index evaluated at -1 and -3 hPa liquid supply pressures correlated with the laboratory method linearly in the RLV Series, regardless of the condition of soil humidity, but the laboratory method was more sensitive. Despite this, the variability of the results is high and the number of replicates must be increased for an adequate characterization.

**Key words:** Water repellency, R index, soil organic matter, soil physical properties.

## INTRODUCCIÓN

La escasez de agua es un problema importante para los sistemas de producción agrícola, las predicciones de cambio climático sugieren que la proporción de agua suministrada a la agricultura por la precipitación está disminuyendo (Foster y Chilton, 2003), siendo necesaria la optimización de la explotación hídrica. Las posibles consecuencias para la humanidad pueden ser graves, especialmente al considerar la disminución de la producción de alimentos en suelos vulnerables con una población mundial cada vez mayor (Tilman *et al.*, 2002).

En el caso de Chile, la situación de los recursos hídricos durante las tres últimas décadas se ha visto influenciada por las políticas macroeconómicas y de otros sectores, dado el fomento de una economía orientada a la exportación basada en productos como el cobre, lo que ha llevado a un importante aumento del uso del agua, en particular en las cuencas relativamente pobres en este recurso en las zonas norte y central del país, provocando al mismo tiempo un descenso de su calidad en algunos casos (BM, 2011).

La incorporación de solutos al suelo y la escasez de agua han desencadenado problemas importantes de manejo al corto y largo plazo, lo que acentúa la precipitación de solutos orgánicos en la superficie del suelo, de manera tal que si se alcanza un contenido crítico de agua, se puede formar una barrera repelente al agua, lo que limita el ritmo y la capacidad de absorción de ésta (Wallis y Horne, 1992; Ritsema y Dekker, 1996). En algunas regiones áridas, la repelencia al agua se ha vuelto tan alta que la producción agrícola no es posible sin mejoras costosas (Roper, 2005).

La hidrofobia de los suelos o repelencia del suelo al agua es la tendencia de las partículas a no hidratarse, ya que con la adsorción de sustancias hidrófobas por parte de las partículas minerales, disminuye la adhesión del agua (Ellies *et al.*, 2003). Este fenómeno se debe a factores bióticos y factores abióticos. Entre los primeros se incluyen agentes como la vegetación, la fauna y el contenido de materia orgánica del suelo; factores abióticos comprenden agentes como la textura, además de la temperatura y la humedad (Doerr *et al.*, 2000). En general la repelencia se incrementa con aumentos de la materia orgánica y disminuye con aumentos en los contenidos de arcilla y limo de los suelos (Harper *et al.*, 2000). Así como existe una relación directa de la hidrofobia con la materia orgánica y la textura, hay una relación aún más compleja entre la textura del suelo y los tipos de componentes orgánicos de este (Capriel *et al.*, 1995).

Los compuestos que son responsables de la hidrofobia se pueden clasificar en dos grupos según Doerr *et al.* (2000): los hidrocarburos alifáticos y los compuestos de estructura anfílica. Los primeros corresponden a sustancias que están formadas por carbono e hidrógeno, en los cuales los átomos de carbono forman cadenas abiertas y ramificadas; éstas son no polares, por tanto, son insolubles en agua. El segundo grupo lo conforman compuestos que presentan un extremo polar y el otro no polar; el extremo polar es

hidrofilico y el no polar es hidrofóbico.

Feng *et al.* (2000) plantean que una de las causas de la repelencia al agua se debe a la incorporación de materia orgánica en el suelo. Estas incorporaciones recubren las partículas minerales y los poros, produciendo la hidrofobia. Sin embargo, estos componentes hidrófobos permiten el desarrollo y la estabilización de la estructura del suelo, puesto que la presencia de ceras, grasas y resinas impiden la disgregación de los agregados, proporcionando estabilidad (Ellies *et al.*, 2003), además de disminuir la velocidad de sorción de agua en agregados secos, previniendo la ruptura por el aire entrampado (Chenu *et al.*, 2000).

Para que se produzca hidrofobia es necesaria además la interacción entre fuerzas en las interfases del suelo. Si la atracción entre el agua y la superficie sólida es mayor que la cohesión interna de las moléculas de agua, el líquido se esparce sobre la superficie. Si esta atracción es menor, las partículas rechazan el agua y se forma un menisco cóncavo en el cual se observa un ángulo de contacto ( $\theta$ ) entre las tres fases (Tschapek, 1966).

Si el ángulo de contacto ( $\theta$ ) se encuentra entre  $90^\circ$  y  $0^\circ$  el suelo absorberá el agua; en el caso contrario, con  $\theta > 90^\circ$ , la presión anticapilar hace que el agua no penetre y se produce la repelencia. Ambas presiones están definidas por la ecuación de Laplace.

(Ecuación 1)

$$P = \gamma_{lg} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\gamma_{lg}}{R} = \frac{2\gamma_{lg} \cos \theta}{r}$$

Donde  $R_1$  y  $R_2$  son el radio principal del menisco del líquido,  $R$  es el radio de la superficie de la esfera del líquido,  $r$  es el radio del capilar,  $\gamma_{lg}$  es la tensión superficial en la interfase y  $\theta$  es el ángulo de contacto.

Es necesario considerar la humedad del suelo al momento de evaluar la hidrofobia, siendo este fenómeno más severo en el suelo seco, ya que, con un contenido alto de agua, las monocapas continuas sobre la fase sólida ayudan a vencer la tensión superficial del agua que ingresa al sistema, disminuyendo el ángulo de contacto entre el líquido y el sólido (Ritsema *et al.*, 2000).

La infiltración se ve principalmente afectada cuando en la superficie de los suelos la materia orgánica, por procesos de secado, induce una repelencia del agua, al igual que los exudados de las plantas y los productos hidrofóbicos de los microorganismos que cubren las partículas de suelo (Dekker *et al.*, 2001a). La infiltración juega un rol fundamental, tanto en manejos agronómicos (riego) como para procesos de importancia ambiental (escorrentía y erosión). Esta propiedad se relaciona con la eficiencia del sistema de riego utilizado, favoreciendo riegos uniformes y eficientes, y la función almacenadora de agua aprovechable dentro del suelo, aumentando la eficiencia de uso de agua y previniendo procesos de degradación por escurrimiento superficial (Hillel, 1998; Bodí *et al.*, 2012). Una

repelencia extrema puede llevar a una pérdida completa en la capacidad de infiltración de un suelo (Robichaud y Hungerford, 2000).

Por lo tanto, es importante conocer los métodos desarrollados para determinar la repelencia al agua del suelo; sin embargo, la mayoría de ellos necesitan disgregar fuertemente el suelo, secarlo o separar sus agregados en cuerpos individuales, desarticulando así la condición natural en la que se encuentran sus poros y agregados. Lo anterior hace que la evaluación que se realiza no represente fielmente las condiciones *in situ*. Entre los métodos usados en la medición de repelencia al agua del suelo, se encuentra la determinación del ángulo de mojado entre el líquido y el sólido (Richardson y Hole, 1978) y las pruebas de sortividad, y si bien estas últimas corresponden a métodos indirectos de medición, son mucho más sencillos de implementar (Gómez, 2008). Dentro de las pruebas de sortividad, el índice “R” de repelencia (Hallet y Young, 1999) es una buena alternativa, ya que mantiene la estructura del suelo y es fácil de implementar sin una gran inversión económica (Orellana *et al.*, 2004). El índice R, desarrollado por Tillman *et al.* (1989), considera la medición de sortividad del agua, la cual al ser una molécula polar se afecta por la repelencia, la cual se compara con la sortividad del etanol, sin influencia de repelencia, para obtener un índice relativo a la máxima humectación generada por el etanol. Si bien el método utiliza muestras no disturbadas, el volumen de estas es bajo, por lo que su representatividad es baja y su variabilidad es alta (Orellana, 2010).

Frente a este escenario, los infiltrómetros de disco a tensión, descritos por Perroux y White (1988), están siendo ampliamente usados para determinar propiedades hidráulicas *in situ* de suelos saturados o cercanos a saturación (Clothier y White, 1981; Wilson y Luxmoore, 1988; Smettem *et al.*, 1995; Jarvis y Messing, 1995). La utilización del minidisco infiltrómetro se presenta como una alternativa para evaluar la hidrofobia en terreno, siendo este aparato de uso práctico para medir las propiedades hidráulicas del suelo (Casanova *et al.*, 2003). Esta técnica se basa en la medición de la infiltración de agua y etanol en el suelo, aplicando una tensión controlada (Perroux y White, 1988). La posibilidad de intercambiar el tipo de líquido que infiltra (agua y etanol) permitiría usarlo como una técnica de evaluación de la hidrofobia *in situ*, por lo que en el presente estudio se plantea que el método de campo para la evaluación de la hidrofobia correlacionará con el método de laboratorio, dado el efecto global de la materia orgánica sobre la estructura y la repelencia al agua del suelo. Sin embargo, es necesario establecer las condiciones de tensión del agua del suelo y del líquido infiltrante que genere los mejores resultados en relación a la prueba de laboratorio.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Validar el índice R obtenido en campo a través del uso del minidisco infiltrómetro con el índice R obtenido en laboratorio.

### **Objetivos específicos**

Evaluar la hidrofobia de dos suelos de clase textural contrastante mediante el uso del minidisco infiltrómetro y el método de sortividad en agua y etanol.

Analizar el efecto del contenido de materia orgánica sobre los resultados de hidrofobia obtenidos en campo y laboratorio.

Comparar los resultados obtenidos mediante ambas metodologías para validar la aplicabilidad del método de campo.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Ubicación del estudio

El estudio se realizó durante el año 2012. Las mediciones de campo se llevaron a cabo en la Comuna de Maipú, Región Metropolitana, en parcelas ubicadas en la Estación Experimental Agronómica Germán Greve Silva (Figura 1), en tanto las mediciones de laboratorio se realizaron en los Laboratorios de Física de Suelos y Química de Suelos, ambos pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Las distintas zonas de estudio se encuentran divididas según suelo y según su uso/manejo en sector con uso agrícola, sector con uso agrícola más ácido húmico y sector nativo.



**Figura 1.** Zonas del estudio. Estación Experimental Agronómica Germán Greve Silva Maipú, Santiago. (Imagen de Mayo 2013, Google maps). El punto blanco marca las coordenadas 33° 28' LS - 70° 50' LO (WGS, 1984).

El estudio consideró dos tipos de suelos, los que se encuentran cartografiados por CIREN (1996) como Serie Mapocho (MPC), miembro de la Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol). Es un suelo de origen aluvial, profundo, que ocupa la posición de terrazas antiguas del río Mapocho. De textura franco arcillo limosa o arcillo limosa en superficie; bien estructurado, generalmente con bloques angulares finos y medios, moderados; de muy buen arraigamiento y muy buena porosidad. El otro suelo pertenece a la Serie Rinconada Lo Vial (RLV), miembro de la Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (Inceptisol). Es un suelo de origen aluvial, estratificado,

ligeramente profundo, que se presentan en terrazas planas, con o sin microrelieve, del río Mapocho. De textura franco arenosa en superficie; estructura de bloques subangulares finos, débiles. Ambos suelos están ubicados en la Estación Experimental Agronómica Germán Greve Silva (33° 28' LS - 70° 50' LO).

Santibáñez y Uribe (1990) señalan que el sitio se encuentra en el distrito agroclimático templado, mesotermal, estenotérmico, mediterráneo, semiárido. El régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían, en promedio, entre una mínima de Julio de 2,8°C y una máxima de Enero de 31° C. El régimen hídrico observa una precipitación media anual de 308 mm, un déficit hídrico de 1063 mm y un período seco de 8 meses, lo cual asegura que las precipitaciones se concentran en los meses de invierno, alcanzando una alta intensidad, con veranos marcadamente secos.

### **Materiales**

Para evaluar el comportamiento hidráulico del suelo, se utilizó un minidisco infiltrómetro Decagon Devices modelo S, en el cual se utilizaron como líquidos infiltrantes tanto agua de riego del sector, como etanol al 95%. Para generar la condición de uso/manejo de suelo bajo uso agrícola y aplicación de ácido húmico, se incorporó como acondicionador @Pow Humus (WSG 85%).

Las muestras de suelos no disturbadas se colectaron con cilindros de acero de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura. Para insertar el cilindro en el horizonte superficial del suelo, se ocupó un portacilindro y un mazo de acero. En laboratorio se dispone del equipamiento necesario para la caracterización de suelo y se implementó el método de sortividad en agua y en etanol con el sistema de capilares propuesto por Hallet y Young (1999).

### **Metodología**

En primera instancia se delimitó el área de estudio mediante la selección de dos Series de suelo contrastantes en la Estación Experimental Agronómica Germán Greve Silva, las cuales fueron las Series Mapocho y Rinconada Lo Vial.

Para definir los tratamientos se utilizaron tres tipos de uso/manejo, los que presentan características contrastantes entre ellos.

Estos son:

- T0: Suelo bajo uso agrícola.
- T1: Suelo bajo uso agrícola con aplicación de ácido húmico (Pow Humus WSG 85%).
- T2: Suelo con vegetación nativa.

Se seleccionaron y delimitaron unidades experimentales de  $2 \times 1 \text{ m}^2$  con tres repeticiones para cada condición de uso/manejo en parcelas divididas al azar. En el caso de los sitios T2, fue necesario retirar la hojarasca que se encontraba en la superficie del suelo de cada unidad experimental. La distancia entre cada repetición fue de 1 metro en el caso de los sitios T0 y T1, mientras que el sitio nativo se encontraba a menos de 50 m de los sitios con labranza.

El sitio agrícola de ambos suelos presentaba una labranza consistente en aradura a 20 cm de profundidad y rastraje. En el sitio de uso agrícola de la Serie Mapocho históricamente se ha desarrollado monocultivo de maíz (*Zea Mays*), presentando rasgos de deterioro estructural por exceso de labranza; por su parte, en la Serie Rinconada Lo Vial se han realizado rotaciones, encontrándose el sitio con una labranza posterior al cultivo de un semillero de zanahorias (*Daucus carota*). El sitio no intervenido (T2), para ambas series de suelo, presentaba árboles de gran envergadura, con acumulación de hojarasca y ausencia de intervención agrícola. En sentido estricto no corresponde a especies nativas, pero para efectos de este trabajo se referirá como sitio nativo para destacar la baja intervención antrópica en los últimos 20 años.

El uso del ácido húmico busca generar una condición intermedia a los otros usos/manejos que corresponden a condiciones contrastantes de materia orgánica en cantidad y tipo; se busca por tanto tener una condición distinta de materia orgánica al momento de realizar las mediciones en campo y toma de muestras. El ácido húmico se aplicó en Febrero del 2012 en dosis de  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  a través de un riego por tendido, aplicando cuidadosamente el producto disuelto en 20 L de agua en la respectiva parcela.

Al cabo de un mes de realizada la aplicación del ácido húmico, se colectaron muestras de suelo no disturbado del horizonte A en cada unidad experimental, realizando una caracterización de propiedades relevantes. Para evaluar el comportamiento hidráulico del suelo, se midió la velocidad de infiltración con un minidisco infiltrómetro, que permite controlar la tensión de suministro de agua a tensiones cercanas a saturación. Con el mismo equipo se evaluó en campo la sortividad con agua y etanol. Estas evaluaciones se realizaron sobre el suelo seco al aire y sobre el mismo suelo húmedo a capacidad de campo, de manera de contrastar condiciones de mojamiento inicial (riego o lluvia) a inicios de temporada (sobre suelo seco) o en plena temporada de riego (sobre suelo húmedo). Finalmente, con muestras tomadas en cilindros metálicos se evaluó en laboratorio la repelencia al agua mediante el índice R, que relaciona la sortividad en agua y etanol (Hallet y Young, 1999).

### **Propiedades evaluadas**

Como caracterización básica del suelo se realizaron mediciones de variables físicas, cada una con tres repeticiones y a una profundidad de 0-10 y 10-20 cm, las cuales fueron:

- Textura, determinada por el método del hidrómetro de Bouyoucos descrita por Gee y Or (2002).

- Densidad aparente ( $D_a$ ), por el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002), utilizando cilindros metálicos de volumen conocido.
- Densidad real ( $D_r$ ), método del picnómetro con muestras tamizadas a 2 mm según metodología descrita por Flint y Flint (2002).
- Velocidad de infiltración a través del uso del minidisco infiltrómetro, que permite controlar la tensión de suministro de agua a tensiones cercanas a saturación.
- Curva característica de retención de agua del suelo, a través de muestras no disturbadas tomadas con cilindros, medidas por la metodología de la cama de arena, olla y plato de presión (Dane y Hopmans, 2002).

Con la curva característica se determinó la distribución de tamaño de poros de acuerdo a Hartge y Horn (2009), clasificándolos en poros de drenaje rápido (PDR) como aquellos que retienen agua entre -2 y -60 hPa ( $> 50 \mu\text{m}$ ), poros de drenaje lento (PDL) que van entre los -60 y -330 hPa ( $50 - 10 \mu\text{m}$ ) y poros de agua útil (PAU) o agua aprovechable, que corresponden a la retención de agua con presiones que se encuentran entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, -33 y -1.500 kPa respectivamente ( $0,2 - 10 \mu\text{m}$ ) (Pagliai y Vignozzi, 2002).

Como complemento se determinó el contenido de materia orgánica (MO) mediante la técnica de calcinación (Sadzawka *et al.*, 2006). Para esto se colectaron muestras compuestas tomadas de la superficie del suelo, las cuales se trasladaron al laboratorio en bolsas plásticas debidamente identificadas. Las muestras se dejaron secar al aire por 24 horas, luego se tamizaron a  $< 2 \text{ mm}$ . Posteriormente, en crisoles de porcelana se colocaron 5 g de las muestras de suelo pesadas en una balanza analítica, luego se dejaron secar en estufa a  $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  durante 2 horas. Al enfriarse las muestras fueron pesadas y luego colocadas en una mufla, las cuales fueron calentadas hasta  $360^\circ\text{C}$ ; una vez alcanzada esa temperatura, se dejaron las muestras en su interior durante 16 horas. Posteriormente se enfrió en la mufla hasta  $150^\circ\text{C}$ , luego en desecador y se pesaron. De esta manera se calculó la pérdida de materia orgánica por el método de calcinación (Ecuación 2).

$$\text{Pérdida por calcinación (\%)} = [(a-b) / (a-c)] \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

a: masa en g del suelo seco a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  más recipiente,

b: masa en g del residuo de calcinación más recipiente,

c: masa en g del recipiente.

Para estimar el contenido de materia orgánica se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Materia orgánica (\%)} = \text{pérdida por calcinación (\%)} \times 0,8 \quad (\text{Ecuación 3})$$

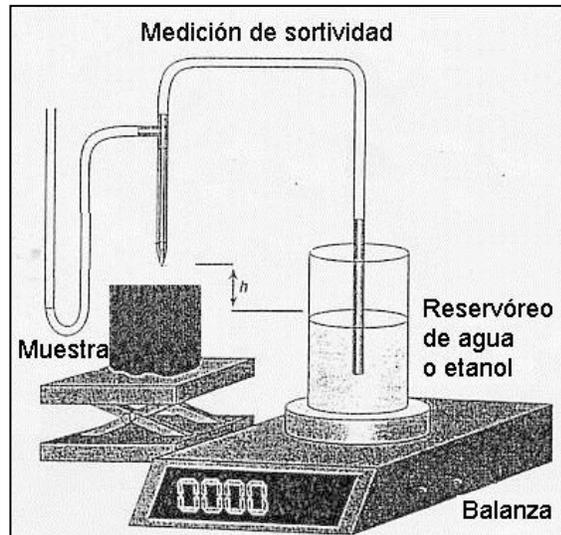
Este factor es aplicable a suelos ubicados entre las Regiones I y Metropolitana (Sadzawka *et al.*, 2006).

### Repelencia al agua

Para la medición de hidrofobia en laboratorio, se tomaron muestras no disturbadas del primer horizonte de cada tratamiento de ambas Series en una profundidad de 0-10 cm, en cilindros metálicos de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura. Los cilindros fueron equilibrados a tensiones mátricas de -33 y -3000 kPa, esto para tener un amplio rango de variación de humedad (desde capacidad de campo a seco al aire, respectivamente).

Con estas condiciones se realizaron pruebas para calcular el índice de Repelencia (R), utilizando la metodología propuesta por Tillman *et al.*, (1989), la cual se basa en la determinación de la sortividad del agua y etanol (95%), a partir de su infiltración en un permeámetro hermético.

Para esta evaluación se utilizó el dispositivo desarrollado por Leeds-Harrison *et al.* (1994), que básicamente consta de una red de capilares (Figura 2) que conducen el líquido (agua o etanol) desde un recipiente hacia la muestra de suelo, la cual provoca una succión que hace avanzar el líquido.



**Figura 2.** Dispositivo desarrollado por Leeds-Harrison *et al.* (1994).

En el dispositivo desarrollado por Leeds-Harrison el agua o etanol infiltran en el suelo en una pequeña área dada por los 4 mm de diámetro del capilar, en cuyo extremo hay una esponja que permite un mejor contacto con el suelo, por ser ambas superficies rugosas, estableciéndose en la punta una presión negativa ( $h$ ) de 1 cm de columna de agua o -1 hPa.

El recipiente que contiene el líquido está sobre una balanza de precisión que registra las

diferencias de peso en la medida que el suelo absorbe. La cantidad de líquido infiltrado en las muestras se registró cada 15 segundos durante un minuto y medio, en el caso de las muestras equilibradas a tensión mátrica de -33 kPa, y cada 30 segundos durante dos minutos y medio para las muestras secas al aire. A partir de la densidad de cada líquido se determinó el volumen infiltrado. En primer lugar se hizo infiltrar agua, y a continuación, en la misma muestra pero en un sector distinto se hizo infiltrar el etanol. Con las gráficas del volumen de agua en función del tiempo se obtuvo el caudal de entrada de agua o etanol, permitiendo estimar la sortividad de cada líquido, considerando un capilar de 4 mm de diámetro, factor  $b = 0,55$  y  $f = 1,0$  de acuerdo a lo propuesto por Hallet y Young (1999), calculando finalmente el índice de repelencia R mediante la relación:

$$R = 1,95 (S_e / S_w) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$S_e$  : Sortividad en etanol,

$S_w$  : Sortividad en agua,

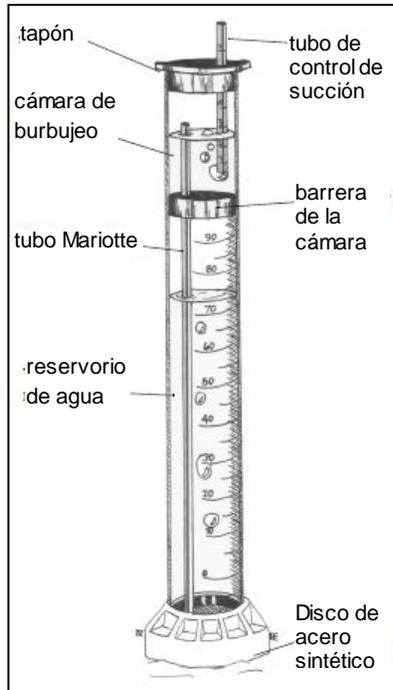
1,95 : Constante que considera las propiedades del agua y el etanol (viscosidad, tensión superficial).

Según los datos obtenidos, se consideró un suelo repelente al agua si los valores de R son mayores a 1,95 (Tillman *et al.*, 1989). Las pruebas constaron de tres repeticiones por unidad experimental para tres tratamientos, dos tensiones mátricas y dos suelos, resultando un total de 36 muestras.

Como contramuestra se realizaron mediciones en terreno para ambas Series, en condiciones de suelo seco al aire y 24 horas después de un riego, generando rangos de humedad comparables con las realizadas en laboratorio, utilizando el minidisco infiltrómetro (Figura 3) para determinar la repelencia al agua del suelo *in situ*, utilizando también agua y etanol como líquidos infiltrantes y la fórmula de R propuesta por Tillman *et al.* (1989).

Para su utilización se llenó la cámara de burbujeo con agua procedente del afluente más cercano de la zona de muestreo, luego se llenó el tubo inferior con el líquido infiltrante correspondiente a la medición. Se retiró presencia de hojarasca o cualquier impedimento físico para una medición directa en el suelo, utilizando una interfase de arena fina; posteriormente se seleccionó la tensión de suministro del líquido y se midió la infiltración durante un período de 10 minutos, registrando las lecturas del reservóreo de agua cada 30 segundos.

Cada evaluación contó con tres mediciones por unidad experimental, a tensiones de -1, -3 y -5 hPa para cada líquido infiltrante. Las mediciones a tensiones de -3 y -5 hPa se realizaron en el mismo punto en que se hizo la primera medición (-1 hPa). El riego busca establecer una condición de tensión interna del agua del suelo similar a las muestras equilibradas a -33 kPa en laboratorio, y se realizó a través de una aplicación de una carga de agua de 10 cm de altura a la unidad experimental, 24 horas previas a la medición.



**Figura 3.** Diagrama del minidisco infiltrómetro Decagon Device modelo S.

### **Diseño experimental y análisis estadísticos**

El proyecto se realizó bajo un diseño de parcelas divididas al azar, con dos suelos y tres tratamientos. Cada parcela corresponde a una Serie de suelo contrastantes en su uso/manejo. La unidad experimental correspondió a la sub parcela de  $2 \times 1 \text{ m}^2$ . Se realizó un análisis de varianza comparando la hidrofobia de los usos/manejos dentro de cada método, cada suelo y cada tensión mátrica, para verificar si existen diferencias significativas entre los tratamientos de uso/manejo. Cuando fue necesario, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tuckey ( $\alpha \leq 5\%$ ). Los datos de hidrofobia obtenidos con los dos métodos fueron correlacionados entre sí, obteniendo un ajuste con cuya significancia se evaluó la validez del método de campo respecto al método de laboratorio. También se realizaron pruebas t para corroborar los parámetros de la ecuación (intercepto igual a cero y pendiente igual a 1).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan, analizan e interpretan los resultados separados en la caracterización general de los suelos y los resultados de repelencia evaluados en campo y laboratorio.

### Propiedades generales de los suelos

#### Textura

La textura depende del material parental y de los procesos de erosión a los que ha estado sometido el suelo durante su pedogénesis, afectando otras propiedades, como estructura, porosidad y consistencia. Los Anexos I y II presentan las descripciones morfológicas de los suelos (CIREN, 1996), mientras que el Cuadro 1 detalla la proporción de separados texturales.

**Cuadro 1.** Resumen de granulometría superficial (0-10 cm) para cada Serie de suelo.

Suelos	Manejo	------(%)-----			Clase textural (USDA)
		Arena	Limo	Arcilla	
RLV	Arado	68,3 ( $\pm 4,17$ )	16,8 ( $\pm 2,49$ )	14,9 ( $\pm 1,75$ )	Fa
	Arado + AH	69,2 ( $\pm 3,17$ )	16,8 ( $\pm 0,58$ )	14,0 ( $\pm 2,59$ )	Fa
	Nativo	64,4 ( $\pm 1,66$ )	21,5 ( $\pm 2,01$ )	14,1 ( $\pm 1,72$ )	Fa
MPC	Arado	46,6 ( $\pm 3,65$ )	39,5 ( $\pm 6,94$ )	13,9 ( $\pm 4,46$ )	F
	Arado + AH	49,3 ( $\pm 1,65$ )	39,5 ( $\pm 2,65$ )	11,2 ( $\pm 3,16$ )	F
	Nativo	51,0 ( $\pm 7,34$ )	40,3 ( $\pm 8,63$ )	8,7 ( $\pm 1,67$ )	F

Promedio  $\pm$  Desviación estándar; dentro de un mismo suelo, no hubo diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey; Fa: Franco arenoso; F: franco.

Ambas Series de suelo presentan una marcada homogeneidad textural, encontrándose en el caso de la Serie Rinconada Lo Vial una distribución que va de partículas medias a gruesas, con una mayor influencia del separado de tamaño arena, el cual supera el 60%, un contenido de limo con valores alrededor del 16% en los sitios arados y con valor por sobre el 20% en el sitio nativo, para finalmente encontrar un porcentaje de material de tamaño arcilla que no supera el 15%. Con estos porcentajes se confirma que el material usado presenta una clase textural Franco arenosa, lo que se encuentra dentro de los rangos esperados para esta Serie (CIREN 1996).

En el caso de la Serie Mapocho, un promedio de 48% de los separados se encontró en

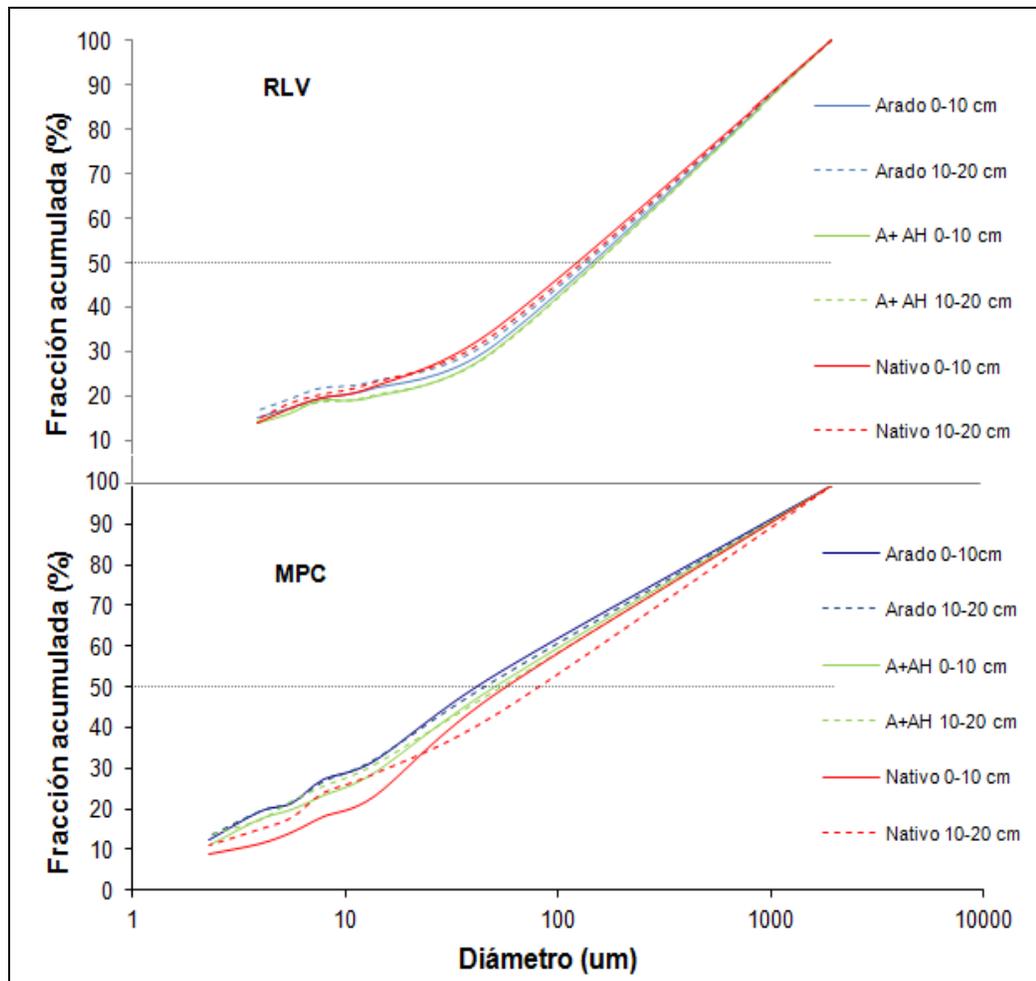
tamaño arena, un 40% en tamaño limo y en el caso de la arcilla, se encontraron niveles menores al 15%, porcentajes que determinan una clase textural Franca, lo que concuerda con lo esperable para esta Serie (CIREN, 1996), que se caracteriza por clases texturales con abundancia de limo. En esta Serie resalta el sitio nativo, el cual presentó un valor porcentual de arena por sobre los sitios con uso agrícola y a su vez, un valor menor en el porcentaje de arcilla. Además de esto, presentó una alta variabilidad, provocado por la heterogeneidad del terreno donde se tomaron las mediciones, dado que fueron realizadas tanto en zonas con una gran cantidad de hojarasca sin intervención de ningún tipo, como en zonas más cercanas a un sendero interior del predio.

Como se muestra en el Apéndice 1, la marcada homogeneidad textural se refleja también en profundidad (10-20 cm), donde se mantiene la clase textural Fa en la Serie RLV, mientras que en la Serie MPC se mantiene la clase textural F, pero con un mayor porcentaje de separado tamaño arena, llegando a una clasificación de Fa en el tratamiento nativo (T2).

En la Figura 4 se presentan las curvas de frecuencia textural acumulada, las cuales se construyeron a partir de un proceso de sedimentación siguiendo la metodología del hidrómetro de Bouyoucos, evaluando la densidad de la suspensión en distintos tiempos. Anterior a esto se realizó un tamizaje para las fracciones más gruesas (>2 mm) con el fin de segmentar al máximo los suelos de acuerdo al diámetro de sus separados. Cuanto más inclinada es la curva o parte de ella, mayor proporción del respectivo tamaño, y cuanto más uniforme la pendiente, mayor la heterogeneidad del material (Hartge y Horn, 2009).

Como se puede observar en la Figura 4 (arriba), la Serie Rinconada lo Vial es uniforme en cuanto a las partículas que lo componen, con una mayor proporción de material grueso y medio (diámetro medio cercano a 100  $\mu\text{m}$ ), con una buena continuidad textural en profundidad, lo que favorece la infiltración de agua a través del perfil, dado que no provoca un cambio brusco de porosidad entre horizontes.

En la Serie Mapocho (abajo), se observa una distribución uniforme de los tamaños de partículas, aunque con pequeñas diferencias entre sitios. En el sitio nativo se observa una disminución de las partículas de arena y limo en profundidad, y a su vez, una mayor proporción de material fino. En general, CIREN (1996) describe una alta homogeneidad textural para esta Serie, y la mayor proporción de partículas gruesas en superficie podría ser resultado del alto contenido de materia orgánica, la cual podría formar microagregados en tamaño arena altamente estable frente a los tratamientos de dispersión.



**Figura 4.** Fracción acumulada *versus* diámetro de partículas para las Series RLV (arriba) y MPC (abajo). La línea punteada horizontal denota el diámetro medio de partículas.

### Densidad aparente, densidad real y materia orgánica

La densidad aparente ( $D_a$ ) se utiliza como parámetro para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y el estado de compactación (Doran y Parkin, 1994). Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre la densidad aparente y la porosidad total, siendo una propiedad altamente sensible al contenido de materia orgánica (MO) y al manejo (Horn, 1994).

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de densidad aparente, densidad real y porcentaje de materia orgánica entre 0-10 cm de profundidad de las muestras utilizadas para ambas Series. Al ser T0 y T1 sitios sometidos a labranza, las propiedades no variaron en forma importante, manteniendo en la profundidad de 10-20 cm las tendencias del horizonte superficial.

**Cuadro 2.** Densidad aparente, densidad real y porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial (0-10 cm).

Suelos	Tratamiento	Da	Dr	Materia orgánica
		-----( $\text{Mg m}^{-3}$ )-----		(%)
RLV	Arado	1,46 ( $\pm 0,13$ ) b	2,51 ( $\pm 0,06$ )	2,24 ( $\pm 0,37$ ) a
	Arado + AH	1,45 ( $\pm 0,12$ ) b	2,50 ( $\pm 0,12$ )	2,57 ( $\pm 0,05$ ) a
	Nativo	1,17 ( $\pm 0,15$ ) a	2,70 ( $\pm 0,21$ )	4,78 ( $\pm 1,12$ ) b
MPC	Arado	1,09 ( $\pm 0,08$ )	2,48 ( $\pm 0,08$ )	4,99 ( $\pm 0,19$ )
	Arado + AH	1,05 ( $\pm 0,06$ )	2,46 ( $\pm 0,03$ )	5,60 ( $\pm 1,68$ )
	Nativo	0,94 ( $\pm 0,20$ )	2,48 ( $\pm 0,03$ )	8,04 ( $\pm 2,60$ )

Promedio  $\pm$  DS; letras distintas en sentido vertical y en el mismo suelo indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ); Da y Dr: densidad aparente y real, respectivamente.

En la Serie RLV, la Da de los sitios T0 (suelo arado) y T1 (suelo arado más ácido húmico) no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí, pero sí con el tratamiento T2 (suelo nativo), el cual presentó el menor valor de Da. Esto se debe a que la labor agrícola, que en estos sitios se realizó año a año, provocó una pérdida de cohesión entre las partículas, disminuyendo su capacidad de soporte y de esta manera, las cargas naturales y antrópicas disminuyen el volumen de poros con un posterior reordenamiento de las partículas del suelo y un incremento en la Da (Horn, 1994). A pesar de esto, los valores de los sitios bajo labranza se encuentran dentro de lo esperado según su clase textural (Sandoval et al., 2012), no así el sitio nativo. El valor menor de Da en el sitio T2 está dado por la acumulación de materia orgánica proveniente de la hojarasca de la vegetación aledaña, con abundante actividad biológica y alta estabilidad. La densidad aparente es una propiedad altamente sensible al contenido de materia orgánica, como lo señalan diversos autores (Kehr, 1983; Rothon, 2000; Caravaca *et al.*, 2001) quienes explican que cantidades mayores de materia orgánica en el suelo disminuyen la Da, debido al aumento en la estabilidad de los agregados y a la mayor macroporosidad. En profundidad (Apéndice 2) se mantuvieron los valores de Da uniformes en relación a lo ocurrido en superficie, denotando el efecto de la labranza incluso a 20 cm de profundidad.

En la Serie MPC, la Da de los tratamientos no presentó diferencias estadísticamente significativas, manteniendo valores bajos en todas condiciones de uso, ya sea por estar recientemente arado o por poseer una baja intervención antrópica. En profundidad (Apéndice 2) se observó un aumento de Da en todos los tratamientos, provocado por la intensa labranza generada en estos sitios, donde tanto la labor agrícola como el paso de maquinarias afectan la porosidad total del suelo, disminuyéndola y por tanto, aumentando la Da.

La profundidad de distribución del ácido húmico y su real impacto dependerá no sólo de la dosis, sino del método de aplicación; en el caso de este ensayo se aplicó el ácido húmico junto con el riego, pero en el periodo posterior a esta fecha no se presentó ningún tipo de

precipitación, lo que habría ayudado a una mejor distribución del producto en profundidad; es por esto que su variación en comparación con el tratamiento T0 no demuestra una diferencia sustancial. En cambio, para el tratamiento T2 se produjo una variación de la Da dada la presencia de la hojarasca sobre el perfil del suelo, la cual aportó la MO que mejoró 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).

La densidad real ( $D_r$ ) es una propiedad que depende fuertemente de la composición mineralógica, donde de forma habitual, para los suelos de mineralogía cristalina se asume un valor de  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , dada la influencia del cuarzo u otros tectosilicatos como componentes dominantes del suelo, los que poseen valores cercanos a dicho valor; por otra parte, su valor puede disminuir por la presencia de altos niveles de materia orgánica, alcanzando valores cercanos a  $2,2 \text{ Mg m}^{-3}$  (Sandoval *et al.*, 2012). Los valores obtenidos de  $D_r$  se encuentran dentro del rango esperado para suelos minerales (Brady y Weil, 1999), sin presentar diferencias estadísticamente significativas para ambas Series, ya que provienen del mismo material parental, respondiendo a la misma mineralogía de suelo (Lal y Shukla, 2004). Sin embargo, los sitios nativos presentaron una mayor  $D_r$  en ambas Series, lo que se contradice con el efecto que tiene la materia orgánica sobre este parámetro, dado que la  $D_r$  tiende a disminuir por efecto de esta (Sandoval *et al.*, 2012). En profundidad (Apéndice 2) se ve este mismo efecto, presentando una alta homogeneidad tanto en superficie como en profundidad (10-20 cm).

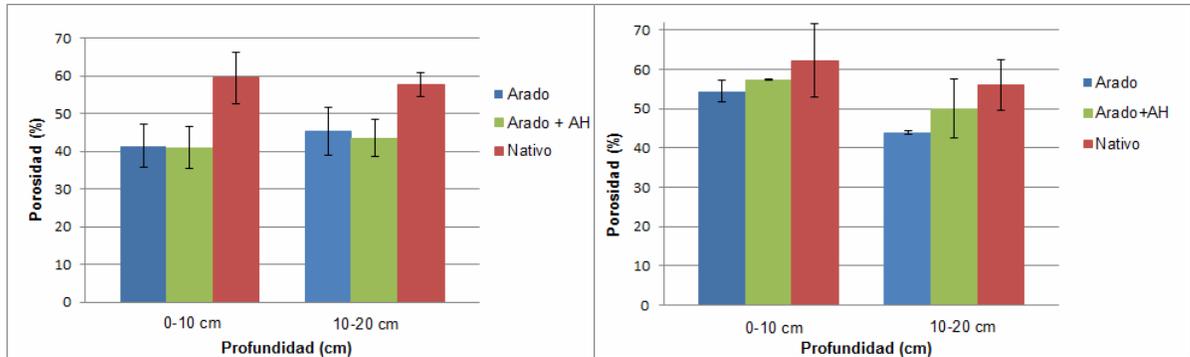
En relación a los porcentajes de materia orgánica (MO), se dieron resultados esperados según los tratamientos que se realizaron, donde los porcentajes mayores de MO se encontraron en los sitios nativos (T2), seguidos por los tratamientos de suelo arado con aplicación de ácido húmico (T1) y finalmente el suelo arado (T0). La mayor concentración de MO en el tratamiento T2 es normal, dado el aporte de residuos vegetales en la superficie del suelo en forma de hojarasca, la que genera un input continuo de MO (Olivares *et al.*, 2006; Villarroel, 2012). Esta misma relación se mantiene en profundidad (10-20 cm), manteniendo diferencias estadísticamente significativas en la Serie RLV (Apéndice 2).

En la Serie RLV no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los contenidos de MO de los tratamientos T0 y T1, pero sí entre estos y el tratamiento T2, destacando el bajo efecto que tuvo la aplicación de ácido húmico en superficie para esta Serie, dada en parte por la baja dosis utilizada. Efecto contrario ocurrió en la Serie MPC, donde hubo una tendencia al aumento de la MO con la aplicación de ácido húmico en el tratamiento T1; a pesar de esto, en esta Serie no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Es bien sabido que la MO disminuye la vulnerabilidad de los suelos al degradarse (Lal, 1994), es así como un elevado nivel en los tratamientos T2 se relaciona con una mejor condición estructural y una mayor estabilidad en relación al resto de los tratamientos, por lo que debería verse reflejado en las características mecánicas (Kay y Angers, 2002), en la infiltración de agua en el perfil de suelo y en la posible aparición de hidrofobia (Hallett, 2008).

## Porosidad

La estructura del suelo está relacionada con la distribución, forma y tamaño de los poros, los que afectan los procesos más importantes del suelo, influyendo en el desarrollo y expansión radicular de las plantas, en el almacenamiento y en el movimiento del agua y del aire (Pagliai y Vignozzi, 2002). La porosidad total de los suelos estudiados fue calculada a partir de la densidad aparente del cilindro y la densidad real tomada a cada muestra, los resultados se presentan en la Figura 5.



**Figura 5.** Porosidad (%) para cada profundidad en las Series RLV (izquierda) y MPC (derecha). Las barras corresponden a  $\pm$  DS.

Se observa un marcado cambio de porosidad total en función del uso del suelo, encontrándose el porcentaje mayor en el tratamiento nativo. Dentro de la Serie RLV (Figura 5, izquierda) se ve una alta homogeneidad de la porosidad en función de la profundidad, encontrándose en el caso del tratamiento T0 cerca de un 40% de poros en superficie, aumentando ligeramente en profundidad; el tratamiento T1 presentó comportamiento similar, en tanto el sitio nativo (T2) presentó sobre 55% de porosidad para ambas profundidades. Dada esta homogeneidad de porosidad total en profundidad, es esperable que la infiltración de agua en el perfil sea óptima, dado que no existe impedimento desde este punto de vista.

En cuanto a la Serie MPC (Figura 5, derecha) se denota una marcada disminución en profundidad de la porosidad para todos los tratamientos, dentro de los cuales, el tratamiento T0 posee una variación de la porosidad de un valor cercano al 55% en superficie a un valor menor a 45% en profundidad; en el caso del tratamiento T1, una disminución de porosidad en superficie de sobre el 55% a un valor de 50% en profundidad, mientras que en el caso del tratamiento T2 cambia de un valor cercano al 63% en superficie a 55% en profundidad. La disminución de porosidad en profundidad es normal, dada la carga sobreyacente del horizonte superficial (Horn *et al.*, 2007). Para el caso de la Serie RLV, entre profundidades no existen diferencias estadísticamente significativas, acusando una homogeneización post cosecha.

### Distribución de tamaño de poros

En el Cuadro 3 se presenta la distribución de tamaño de poros, la cual refleja la funcionalidad del sistema poroso del suelo. Los resultados de la profundidad de 10-20 cm mantienen las tendencias del horizonte superficial, sus resultados se presentan en el Apéndice 3.

**Cuadro 3.** Distribución volumétrica (%) del tamaño de poros (0-10 cm) de los tratamientos.

Tamaño poro ( $\mu\text{m}$ )	Tratamiento	RLV	MPC
PDR (%) ( $>50 \mu\text{m}$ )	Arado	23,1 ( $\pm 8,0$ )	18,6 ( $\pm 4,0$ )
	Arado + AH	20,4 ( $\pm 11,3$ )	19,1 ( $\pm 1,4$ )
	Nativo	27,3 ( $\pm 9,3$ )	21,7 ( $\pm 7,1$ )
PDL (%) (50 a $>10 \mu\text{m}$ )	Arado	2,9 ( $\pm 3,5$ )	6,9 ( $\pm 1,6$ )
	Arado + AH	3,0 ( $\pm 1,6$ )	6,0 ( $\pm 1,0$ )
	Nativo	7,8 ( $\pm 5,2$ )	6,2 ( $\pm 2,1$ )
PAU (%) (10 a $0,2 \mu\text{m}$ )	Arado	10,6 ( $\pm 3,5$ )	15,1 ( $\pm 3,2$ )
	Arado + AH	12,0 ( $\pm 2,9$ )	13,2 ( $\pm 2,6$ )
	Nativo	15,2 ( $\pm 3,9$ )	13,3 ( $\pm 4,4$ )
PAI (%) ( $< 0,2 \mu\text{m}$ )	Arado	9,3 ( $\pm 1,2$ )	13,2 ( $\pm 0,4$ ) a
	Arado + AH	9,0 ( $\pm 1,4$ )	13,4 ( $\pm 2,1$ ) ab
	Nativo	8,6 ( $\pm 0,3$ )	16,8 ( $\pm 1,3$ ) b

Promedio  $\pm$  Desviación estándar; letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ). PDR, PDL, PAU y PAI: Poros de drenaje rápido, poros de drenaje lento, poros de agua útil y poros de agua inútil, respectivamente.

Los poros de drenaje rápido y lento (PDR,  $> 50 \mu\text{m}$ ; PDL,  $10-50 \mu\text{m}$ ) favorecen el flujo rápido de agua, asegurando la renovación del aire del suelo, los poros de agua útil (PAU,  $0,2-10 \mu\text{m}$ ) aseguran el suministro de agua para las plantas, mientras que los poros de agua inútil (PAI,  $< 0,2 \mu\text{m}$ ) retienen el agua con tensiones mayores al punto de marchitez permanente (PMP), no estando disponible para las funciones fisiológicas de los cultivos (Hartge y Horn, 2009).

Como se observa en el Cuadro 3, todos los tratamientos de la Serie RLV presentaron valores promedio de PDR por sobre el 20% y en el caso de la Serie MPC cercanos también a este valor, lo que según Pagliai y Vignozzi (2002) corresponden a suelos muy porosos para el rango  $> 50 \mu\text{m}$ . Existe una marcada diferencia entre los valores de los sitios agrícolas (T0 y T1) y el nativo, donde este último presentó los valores más altos de PDR; a pesar de esto, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas dada la

variabilidad de los resultados y el efecto de la soltura mecánica generada por la labranza (Ellies y Hartge, 1990; Ellies *et al.*, 1994).

En el caso de los PDL, en la Serie RLV se vio una diferencia clara entre los tratamientos agrícolas y el nativo; a pesar de esto, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas; en el caso de la Serie MPC no se presentó esa diferencia. Shepherd *et al.* (2001) argumentan que las enmiendas orgánicas, 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 tránsito agrícola; además, el proceso de asentamiento natural incrementa la proporción de PDL, disminuyendo la conductividad hidráulica del suelo y la difusión de gases (Ellies *et al.*, 1994). Sin embargo, en este estudio el ácido húmico no generó los cambios esperados en lo que respecta a porosidad gruesa, a diferencia de otros estudios (Cortés, 2011; Fernández, 2013), donde se verificó que este tipo de enmiendas promueven la formación de poros gruesos.

En relación a los PAU, en la Serie RLV se produjo un aumento de esta en función de los tratamientos, encontrándose una relación directa con el contenido de MO, aunque sin diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. 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; Fernández, 2013), efecto que se ve reflejado a pesar de la baja dosis de aplicación de ácido húmico; sin embargo, en la Serie MPC el resultado no se dio según lo esperado, ya que el mayor contenido de PAU se presentó en el tratamiento T0, posiblemente como consecuencia de la menor porosidad total (Figura 5) y la menor porosidad gruesa (Cuadro 3), la que colapsó a tamaño de poros de agua útil.

Finalmente, dentro de los PAI, la Serie RLV no presentó diferencias estadísticamente significativas, encontrándose los contenidos de agua en el rango esperado para suelos franco arenosos (Warrick, 2002). En el caso de la Serie MPC se encontró la única diferencia estadística dentro de la distribución de tamaño de poros, en la que el sitio nativo (T2) presentó el valor más alto de PAI. En este caso, la influencia de la hojarasca proveniente de los árboles, los cuales llevan en ese sector muchos años, pudo provocar una mayor proporción de poros de menor tamaño ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) por taponamiento con coloides orgánicos altamente estables (Ellies, 1988).

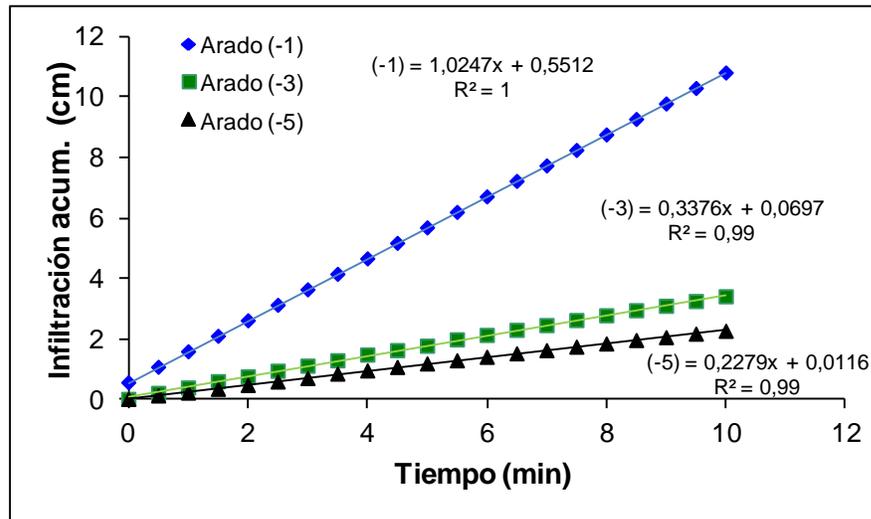
En profundidad (10-20 cm) hubo un aumento de PDR y PDL en la Serie RLV (Apéndice 3), denotando el aumento de porosidad total en el suelo (Figura 5). En cambio, en la Serie MPC hubo una disminución de PDR, con el porcentaje menor en el tratamiento nativo. Se ha visto que en sistemas vegetacionales de bosques, el movimiento pendular del árbol por efecto del viento, puede provocar la compactación del subsuelo cuando existe un hábito de crecimiento horizontal de las raíces (Godefrois y Koedam, 2010); sin embargo, en este caso la muestra es demasiado superficial, por lo que la pérdida de la porosidad estructural en el sitio nativo de la Serie MPC podría corresponder a un pie de arado pre-existente. En relación a los PAU, el monto se mantuvo estable en relación al horizonte

superficial, en el caso los tratamientos arados (T0 y T1) de la Serie RLV pero disminuyó en el tratamiento nativo (T2). Caso contrario, en la Serie MPC hubo una disminución de los PAU en los tratamientos arados y un aumento en el tratamiento nativo, relacionado al descenso en esta misma Serie de los PDR en el tratamiento nativo. Finalmente, los PAI se mantuvieron homogéneos en profundidad para la Serie RLV, mientras que para la Serie MPC hubo un aumento, también ligado a la disminución de los PDR y el efecto de las raíces de los árboles aledaños, acompañado de un incremento de arcilla en profundidad (Apéndice 1).

## Propiedades hidráulicas

### Velocidad de infiltración (VI)

A modo de ejemplo se presenta la Figura 6, en la cual se muestra la infiltración acumulada, que relaciona la cantidad de agua que ingresa a un suelo en función del tiempo (Dirkssen, 1999), cuya pendiente se asume cercana a la conductividad hidráulica del suelo. El gráfico pertenece al tratamiento Arado (T0) en condición seca al aire para la Serie de suelo MPC. El resto de los gráficos se presentan en los Apéndices 4 y 5 para la Serie RLV y MPC, respectivamente.



**Figura 6.** Infiltración acumulada (cm) en función del tiempo (min) para el tratamiento “Arado” (T0) en condición de suelo seco dentro de la Serie MPC. El valor negativo (-1, -3, -5) corresponde a la tensión (hPa) de medición.

En la Figura 6 se ve reflejado el efecto que tiene el aumento de la tensión de suministro de agua, la que varía entre -1 y -5 hPa, en relación a la velocidad de infiltración en el perfil de suelo. Como se puede apreciar, a medida que aumenta la tensión de suministro de agua, menor es la pendiente de la curva y por lo tanto, menor es la velocidad de infiltración. Esto se debe a que al comenzar la prueba de infiltración de agua en el perfil, esta se realiza mayoritariamente por poros gruesos, los que favorecen el flujo rápido de agua (Hartge y

Horn, 2009), pero a medida que aumenta la tensión de suministro de agua los poros gruesos se desaturan, recayendo la función del flujo en los poros más pequeños. De este modo, de acuerdo a la ley de Poiseuille (Jury y Horton, 2004), si el radio de los poros funcionales se reduce a la mitad, el caudal que pasa por esos poros tendrá una capacidad de flujo 16 veces menor, ya que el flujo es inversamente proporcional al radio elevado a la cuarta potencia.

En relación a las características de este tratamiento, según Casanova *et al.* (2008) los valores obtenidos para la VI son considerados como de clase muy rápida en las tres tensiones de suministro. Esta clasificación da cuenta que el terreno donde se realizó esta medición presenta una alta infiltración, dado el efecto de la clase textural Franca y la condición de soltura mecánica promovida por la labranza, en los casos de T0 y T1.

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).

Para evaluar el efecto de los distintos tratamientos, se usó la prueba de Tuckey, en la que se compararon las pendientes en el rango de velocidad de infiltración estabilizada, resultados presentados en el Cuadro 4.

La condición de humedad que presenta el suelo previo a las mediciones de VI influyen en la menor o mayor intensidad de esta. En general, para un suelo en condición seca y humectable previo a su medición, la VI tiene un patrón con una tasa alta, seguido por una rápida declinación para llegar, en la mayoría de los casos, a una tasa de infiltración casi constante (Potter *et al.*, 1995). El proceso inicial de humectación corresponde al fenómeno de sortividad, favorecido por superficies secas no hidrófobas que rápidamente se cubren con agua al romper la tensión superficial de ésta (Jury y Horton, 2004). Esto se vio reflejado en los suelos arados de la Serie MPC, donde la tasa de VI en condición seca es mucho mayor a la de la condición de suelo húmedo, en cambio, en la condición de baja intervención (Nativo) se dio el efecto contrario. Al respecto, Jaramillo (2006) explica que en un suelo humectable, el proceso de humedecimiento inicial es rápido debido a las altas fuerzas de atracción que se generan entre los sólidos del suelo y el agua; sin embargo, este proceso puede llegar a ser extremadamente lento en suelos que, estando secos, presentan materiales repelentes al agua. La Serie RLV tendió a comportarse como un suelo hidrófobo, con excepción de T1, en el que la aplicación de ácido húmico favoreció los procesos de humectación en el suelo en condición inicial seca.

**Cuadro 4.** Velocidad de infiltración (VI) ( $\text{cm h}^{-1}$ ) evaluada sobre condiciones de suelo húmedo y suelo seco para ambas Series de suelo.

Suelos	Tratamiento	Velocidad de infiltración ( $\text{cm h}^{-1}$ )		
		Tensión de suministro de agua (hPa)		
		-1	-3	-5
<b>Suelo húmedo</b>				
RLV	Arado	17,40 ( $\pm 10,61$ ) a	9,85 ( $\pm 8,35$ )	6,00 ( $\pm 4,17$ )
	Arado + AH	8,00 ( $\pm 1,00$ ) a	4,87 ( $\pm 0,99$ )	3,32 ( $\pm 0,75$ )
	Nativo	34,35 ( $\pm 0,53$ ) b	16,78 ( $\pm 0,94$ )	7,55 ( $\pm 0,00$ )
MPC	Arado	5,17 ( $\pm 1,63$ )	2,43 ( $\pm 0,22$ ) a	1,83 ( $\pm 0,59$ ) a
	Arado + AH	11,82 ( $\pm 4,16$ )	4,95 ( $\pm 1,73$ ) a	2,92 ( $\pm 0,35$ ) ab
	Nativo	22,28 ( $\pm 12,28$ )	17,43 ( $\pm 5,02$ ) b	7,47 ( $\pm 3,33$ ) b
<b>Suelo seco</b>				
RLV	Arado	9,86 ( $\pm 4,31$ ) a	7,45 ( $\pm 1,00$ ) a	4,79 ( $\pm 1,00$ ) a
	Arado + AH	16,21 ( $\pm 6,25$ ) ab	11,05 ( $\pm 2,50$ ) a	8,87 ( $\pm 1,69$ ) b
	Nativo	25,96 ( $\pm 3,56$ ) b	16,99 ( $\pm 2,95$ ) b	10,07 ( $\pm 0,26$ ) b
MPC	Arado	61,48 ( $\pm 21,48$ ) b	20,25 ( $\pm 5,57$ ) b	13,67 ( $\pm 3,43$ )
	Arado + AH	61,21 ( $\pm 31,48$ ) b	22,07 ( $\pm 8,41$ ) b	14,83 ( $\pm 5,39$ )
	Nativo	0,83 ( $\pm 0,64$ ) a	0,47 ( $\pm 0,43$ ) a	N.D.

Promedio  $\pm$  DS; letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ). N.D.: No determinado.

En relación al efecto que tiene la tensión de suministro sobre la VI, como era de esperar, a medida que mayor fue esta tensión menor fue la infiltración de agua en el perfil de suelo. Al comenzar la infiltración de agua con la tensión de suministro de -1 hPa, son los poros gruesos los que realizan el movimiento de agua a zonas más profundas, dada la baja resistencia impuesta en la entrega de agua. A medida que aumenta la tensión de suministro, los poros más gruesos se desaturan y son los poros más finos los que se encargan del flujo de agua, pero al tener un menor radio, provocan una menor VI en todo el perfil de suelo (Tschapek, 1996).

La velocidad de infiltración de la lámina de agua dependerá directamente de la cantidad de PDR y de la MO, teniendo presente que a mayor contenido de MO se puede producir un efecto de hidrofobia generado por la misma (Ellies *et al.*, 1996). El efecto de hidrofobia provoca que la tasa de infiltración sea menor en los primeros eventos de lluvia de la temporada o después de un prolongado tiempo de sequía (Burch *et al.*, 1989; Imeson *et al.*, 1992), pero esta característica cambia al estar en plena época de lluvias, donde la hidrofobia disminuye y se genera la máxima tasa de infiltración.

En relación al efecto tratamiento, se puede apreciar en la Serie RLV para la condición de suelo húmedo, que existen diferencias estadísticamente significativas para la tensión de suministro de -1 hPa, con una mayor VI en el sitio nativo. Esto es debido al mayor porcentaje de poros de drenaje (Cuadro 3), cuya presencia se favorece por la existencia de

partículas gruesas (Hillel, 1998). Además, una mayor VI 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; Le Bissonnais y Arrouays, 1997). De acuerdo a Casanova *et al.* (2008), los valores de VI se encuentran desde el rango moderadamente rápido en el sitio arado con ácido húmico hasta muy rápido en el sitio nativo.

En el caso de la tensión de suministro de -3 hPa y -5 hPa de la Serie RLV en condición húmeda, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sitios. Se puede apreciar la menor VI en el tratamiento T1, siendo contraproducente, dado que se esperaba un aumento por efecto de la aplicación de ácido húmico. En este sentido, Seguel *et al.* (2003) encontraron para suelos de textura gruesa tratados con enmiendas orgánicas (bioabono y estiércol bovino) un incremento significativo de la infiltración respecto de los mismos suelos sin tratar; en tanto, Marín (2011) determinó hasta un 25% más de VI en un suelo arcilloso tratado con ácido húmico en relación al suelo no tratado.

En la Serie MPC, para la condición de suelo húmedo, se ve reflejado en las distintas tensiones un aumento de la VI en función del contenido de MO, encontrándose los valores menores en el tratamiento T0 (arado). La VI es una propiedad que se asocia a la textura y a la estructura de un suelo, siendo ésta última altamente dependiente de los contenidos de materia orgánica, dado que niveles adecuados de MO en el suelo promueven la formación de macroporos y, consecuentemente, mejoran la tasa de infiltración (Brady y Weil, 1999).

Como en el flujo de agua en condiciones saturadas participa todo el sistema poroso, la mayor porosidad total y, en particular, la porosidad gruesa del tratamiento nativo (T2), favoreció una VI estabilizada significativamente mayor en relación a los otros tratamientos, resultado que concuerda con otros estudios (Seguel *et al.*, 2003; Pfeiffer *et al.*, 2008).

Dentro de la tensión de suministro de agua de -1 hPa, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de MPC evaluados con el suelo inicialmente húmedo; a pesar de esto, la clase de VI es distinta entre ellos, donde el tratamiento T0 se clasifica como una VI moderada, mientras que los tratamientos T1 y T2 se clasifican como VI rápida (Casanova *et al.*, 2008). En la tensión de -3 hPa no se presentaron diferencias importantes en la capacidad de infiltración de agua entre los tratamientos T0 y T1, pero sí entre estos y el tratamiento T2. Finalmente, en la tensión de suministro de -5 hPa se generaron diferencias entre el sitio arado y los otros dos tratamientos, aunque claramente disminuye la VI como consecuencia de la incapacidad de los poros gruesos de conducir agua a altas tensiones (Warrick, 2002).

En la Serie RLV para la condición de suelo seco, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos T0 y T2 para las tres tensiones y entre T1 y T2 para la tensión de -3 hPa, siendo mayor la VI en el suelo nativo. Es esperable una mayor VI en el sitio nativo, dada la alta cantidad de poros gruesos y la mayor estabilidad ante el mojado como consecuencia del mayor contenido de materia orgánica (Le

Bissonnais y Arronays, 1997; Seguel *et al.* 2012; Ellies *et al.* 1995). Destaca igualmente el efecto humectante que generó el ácido húmico, teniendo una VI similar al sitio nativo. Es esperable que el efecto del ácido húmico, si se continúa con las aplicaciones en forma habitual, sea el aumento de la capacidad de retención de agua, debido al efecto que este tiene sobre la estructura, dada su naturaleza coloidal (Mondaca, 2000).

Finalmente, en la Serie MPC para la condición de suelo seco, se puede apreciar la mayor VI en los sitios arados, como resultado de un fuerte proceso de sorción inicial de agua (Jury y Horton, 2004). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas tanto para la tensión de suministro de -1 hPa como para la tensión de -3 hPa, donde los valores máximos de VI son para los tratamientos T0 y T1, entre los cuales no existen diferencias significativas. El comportamiento de la VI estabilizada en estos suelos avala el efecto que tiene la clase textural Franca sobre el movimiento de agua, la cual genera una infiltración constante, dada la homogeneidad tanto textural como de la porosidad total (Figura 5) y poros de drenaje (Cuadro 3). Además, en estos tratamientos la infiltración inicial fue más veloz, promoviendo una estabilización de la infiltración de forma más lenta, dando como resultado una pendiente de la curva de infiltración acumulada (Apéndice 5) más pronunciada.

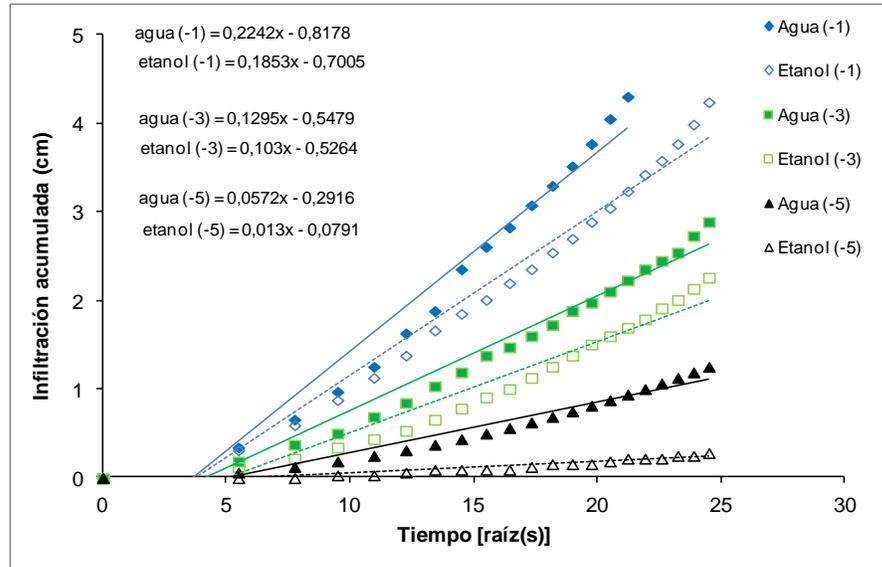
Es destacable en MPC en condición seca al aire la alta diferencia entre los valores de VI de los tratamientos T0 y T1 comparados con el tratamiento T2, donde el efecto de la MO presente en la superficie del perfil influye drásticamente en la entrada de agua, llegando al punto que, en la tensión de suministro de -5 hPa, no ingresó agua en el suelo en ninguna de las tres repeticiones, generando un valor considerado cero (N.D.). Esta alta repelencia al agua por parte del tratamiento T2 se relaciona al contenido de MO; al respecto, Ellies *et al.* (1996), señalan que bajo bosque es posible encontrar componentes orgánicos de cadenas más largas que muestran propiedades hidrófobas mayores que las encontradas bajo la pradera, lo que permite hablar de “calidad” de materia orgánica desde el punto de vista de la hidrofobicidad, resultando que fue corroborado por Chenu *et al.* (2000) al comparar la repelencia y estabilidad de suelos con distintas procedencias y clases texturales, destacando un suelo bajo bosque, con alto contenido de materia orgánica, alta estabilidad estructural pero muy baja infiltración de agua.

### **Análisis de repelencia al agua**

La teoría propuesta por Tillman *et al.* (1989) considera la medición de la repelencia al agua basado en la sortividad intrínseca de dos líquidos (Wallis *et al.*, 1991; Wallis y Horne, 1992), los cuales son agua y etanol al 95%, a partir de su infiltración en un permeámetro hermético; así, la capacidad de absorción de agua (influenciado por repelencia) se compara con la capacidad de absorción de etanol (no influenciada por la repelencia) para obtener un índice de repelencia al agua.

La teoría establece que inicialmente un suelo seco sorbe agua en grandes cantidades,

generando una curvatura que se estabiliza en el tiempo. Este fenómeno inicialmente no corresponde a conductividad hidráulica ( $K$ ), ya que se sabe que en el suelo saturado la  $K$  es máxima, y al empezar las pruebas de infiltración el suelo no está saturado. Por lo tanto, para facilitar el análisis se ha establecido (Jury y Horton, 2004) que aplicando la raíz del tiempo esta relación se hace lineal, reconociéndose la parte inicial del fenómeno de sorción como sortividad. A modo de ejemplo, la Figura 7 presenta una de las rectas de sortividad obtenidas en la presente investigación a distintas tensiones de suministro, mientras que la totalidad de las rectas promedios se presentan en los Apéndices 6 y 7.



**Figura 7.** Recta de sortividad (terreno) de la Serie RLV, en condición de suelo húmedo y tratamiento nativo.

Como se observa en la Figura 7, las muestras sometidas a tensiones de suministro crecientes presentan una disminución de la pendiente de la curva. El ajuste gráfico, que se expresa en una ecuación lineal, establece que la pendiente de la curva corresponde a la sortividad del tratamiento ( $\text{cm s}^{-1/2}$ ). Estos valores de sortividad incorporados al índice R desarrollado por Tillman *et al.* (1989), dan como resultado los valores de repelencia para cada tratamiento.

Además, se puede apreciar en la Figura 7 y en los Apéndices 6 y 7, que en los suelos humectables, con agua y etanol se obtuvieron prácticamente las mismas curvas de infiltración para el tiempo de observación utilizado; en cambio, cuando los suelos fueron repelentes al agua, hubo una marcada diferencia entre las curvas conseguidas con etanol y agua. Para que se aprecie de forma marcada la repelencia al agua en las curvas, la pendiente del etanol debe ser necesariamente mayor a la pendiente del agua infiltrada.

### Índice de repelencia R en laboratorio

La repelencia al agua en el suelo se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos hidrofóbicos, los cuales no presentan un grado de alteración muy avanzado. Estos compuestos pueden producirse por el metabolismo y/o la descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales (Doerr *et al.*, 2000), por someter al suelo a incendios, quemas y calentamiento o secado (DeBano, 1981, 2000; Dekker y Ritsema, 2000) o por contaminación del suelo por petróleo y/o sus derivados (Roy y McGill, 1998). Estos compuestos apolares de la materia orgánica se producen durante su mineralización y cubren la superficie de los minerales, disminuyendo la capacidad de humectación de los suelos. Con el aumento de estos compuestos, particularmente los polisacáridos, se incrementa la estabilidad de los agregados del suelo, al igual que la capacidad de retención de agua, afectando la conductividad hidráulica (Hue, 1995).

La hidrofobicidad se ubica, en el caso más común, en la superficie del suelo y, de forma frecuente, en manera de parches, áreas de suelo hidrofóbico que alternan con cuerpos de suelo humectable. Se reconoce que la repelencia al agua es un fenómeno de superficie específica (Dekker y Ritsema, 1994), pero un factor que puede restar importancia al fenómeno de superficie específica es que las partículas o los agregados no tienen que estar recubiertos completamente con sustancias hidrofóbicas para que el suelo, en su conjunto, se manifieste como tal (Bisdorn *et al.*, 1993; Dekker, 1998; Doerr *et al.*, 2000).

El Cuadro 5 muestra los valores del índice de repelencia (R) promedio obtenidos a partir de mediciones de sortividad en agua y etanol en laboratorio para muestras equilibradas a -33 kPa en olla de presión y secas al aire.

**Cuadro 5.** Índice de repelencia (R, adimensional) obtenido por el método de laboratorio (Tillman *et al.*, 1989) en muestras equilibradas a -33 kPa y secas al aire.

Suelos	Manejo	Índice de repelencia R	
		Tensión Mátrica del suelo	
		-33 kPa	Seco al aire
RLV	Arado	2,18 ( $\pm 0,57$ )	2,95 ( $\pm 1,01$ )
	Arado + AH	1,84 ( $\pm 0,20$ )	5,88 ( $\pm 1,51$ )
	Nativo	3,30 ( $\pm 2,57$ )	2,52 ( $\pm 1,55$ )
MPC	Arado	3,90 ( $\pm 1,45$ )	5,72 ( $\pm 1,32$ ) ab
	Arado + AH	3,17 ( $\pm 0,18$ )	4,41 ( $\pm 1,02$ ) a
	Nativo	3,51 ( $\pm 0,95$ )	9,94 ( $\pm 3,29$ ) b

Promedio  $\pm$  DS; letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ); R: índice de repelencia.

Como era de esperar, en el método de laboratorio se encontraron valores promedio de repelencia al agua mayor en la condición de suelo seco, como se muestra en el Cuadro 5. Estudios previos muestran que existe una resistencia a la humectación después de periodos

secos prolongados (Blume *et al.*, 2007), ocasionando patrones de flujo de humectación y flujos preferenciales en los suelos, generando además escurrimiento superficial después de eventos lluviosos (Urbanek *et al.*, 2007; Wallis *et al.*, 1991).

Los tratamientos no presentaron diferencias estadísticamente significativas en la Serie RLV, tanto en las muestras equilibradas a -33 kPa como las secas al aire. Sin embargo, resalta el tratamiento T1 (Arado + AH), el cual, en tensión mátrica del suelo de -33 kPa presentó un comportamiento hidrófilo (Hallett *et al.*, 2001) con valor de R menor a 1,95; a su vez, este mismo tratamiento mostró un comportamiento fuertemente hidrófobo al encontrarse en condición seca al aire. Esto muestra la variabilidad que puede presentar un mismo tratamiento frente a la condición de humedad del suelo, siendo importante este factor en relación al manejo de la hidrofobia del suelo (Doerr y Thomas, 2000). Esto confiere al suelo en condición húmeda una cierta inestabilidad al soportar cargas de agua, ya que las moléculas bipolares del agua entran al agregado en forma violenta, disgregándolo con facilidad (Chenu *et al.*, 2000). Este fenómeno podría no ser tan crítico, dado que presenta un contenido de arcilla de 14% y un contenido de materia orgánica de 2,57% (Cuadros 1 y 2), factores que resultan preponderantes en la estabilidad de un suelo.

El resto de los tratamientos de esta Serie presentaron un valor de R mayor a 1,95, por lo tanto se consideran hidrófobos. Estos promedios no alcanzaron condiciones extremas de repelencia al agua ya que, como señala Hallett (2008), valores de R de entre 2,0 y 4,0 se consideran como adecuados para asegurar una buena estabilidad frente al agua sin generar una repelencia excesiva. Así, estos valores son considerados como una repelencia subcrítica, favoreciendo el humedecimiento lento del suelo (Hallett *et al.*, 2001) lo que es deseable para asegurar una buena estabilidad de agregados, que no forman costras cuando están al descubierto, reduciéndose con ello la erosión al no dispersarse las partículas (Ellies *et al.*, 1995).

En el caso de la Serie MPC, se dio la condición de suelo hidrófobo en los tres tratamientos, indistintamente de la condición de humedad, presentando diferencias estadísticamente significativas en el caso de suelo seco al aire, donde el tratamiento T2 (nativo) presentó el mayor valor de R, seguido por el tratamiento T0 y finalmente el tratamiento T1. En estudios previos se registraron comportamientos hidrófobos en condiciones de suelos húmedos desarrollados en climas tropicales (Jaramillo, 1992; Pérez *et al.*, 1998; Jaramillo *et al.*, 2000), en clima húmedo mediterráneo (Doerr y Thomas, 2000) y en otros climas húmedos del norte de Europa (Doerr *et al.*, 2000). En la condición de suelo húmedo se vio reflejada una mayor influencia de la clase textural sobre el valor de repelencia, dado que presenta valores promedios similares entre los tres tratamientos, reflejo de una clase textural Franca. Esto es debido a que la retención del agua por el suelo es por medio de adsorción a las partículas sólidas, siendo la intensidad de esta adsorción consecuencia de la superficie específica del suelo, la cual depende de la textura, la estructura, la presencia de materia orgánica y el contenido de agua (Pachepsky y Rawls, 1999).

En la condición de suelo seco de la Serie MPC se encontraron valores del índice R sobre 4, valores que se relacionan con una repelencia excesiva, que favorece el escurrimiento superficial en sectores con mayor pendiente, microrelieve, o con una mala distribución de

agua dentro del perfil de suelo, aspectos que no ocurrieron en este ensayo, dada la topografía y el manejo del sector de muestreo. No se encontró un mayor efecto en esta condición de humedad para la aplicación de ácido húmico, dado que no tuvo diferencias estadísticamente significativas con el tratamiento T0; a pesar de esto, esta aplicación provocó una menor repelencia al agua, con un comportamiento más homogéneo en un amplio rango de contenido de agua. En general, la repelencia al agua en el suelo puede llevar a problemas de importancia agrícola y ambiental, como el incremento de la escorrentía, problemas en el proceso de infiltración y la susceptibilidad a la erosión (Feng *et al.*, 2000), pudiendo generar grandes pérdidas en la producción agropecuaria y forestal; además, al generar vías de flujo preferencial, facilita el movimiento de agua y de contaminantes a través del suelo (Jaramillo, 2006).

### Índice de repelencia R *in situ*

En relación a las mediciones realizadas en terreno, se presenta el Cuadro 6, donde se muestran los valores del índice de repelencia (R) promedio obtenidos a partir de mediciones de sortividad en agua y etanol con el uso del minidisco infiltrómetro, con muestras en condición de suelo húmedo (-33 kPa) y secas al aire.

**Cuadro 6.** Valores del índice de repelencia (R) obtenidos con el uso del minidisco infiltrómetro en terreno en dos condiciones de humedad de suelo y tres tensiones de suministro de los líquidos infiltrantes.

Suelos	Manejo	Índice de repelencia R		
		Tensión de suministro de agua (hPa)		
		-1	-3	-5
<b>Suelo húmedo</b>				
RLV	Arado	0,47 ( $\pm 0,24$ ) a	0,61 ( $\pm 0,24$ ) a	0,22 ( $\pm 0,11$ )
	Arado + AH	0,45 ( $\pm 0,22$ ) a	0,71 ( $\pm 0,33$ ) a	0,64 ( $\pm 0,35$ )
	Nativo	1,61 ( $\pm 0,15$ ) b	1,55 ( $\pm 0,01$ ) b	0,44 ( $\pm 0,06$ )
MPC	Arado	1,38 ( $\pm 0,46$ )	2,35 ( $\pm 1,27$ )	1,12 ( $\pm 0,05$ )
	Arado + AH	2,11 ( $\pm 2,09$ )	2,17 ( $\pm 1,26$ )	1,13 ( $\pm 0,41$ )
	Nativo	4,62 ( $\pm 5,69$ )	1,21 ( $\pm 0,47$ )	1,55 ( $\pm 1,77$ )
<b>Seco al aire</b>				
RLV	Arado	3,97 ( $\pm 1,44$ ) b	3,27 ( $\pm 1,07$ ) b	1,63 ( $\pm 0,20$ ) b
	Arado + AH	2,48 ( $\pm 0,94$ ) ab	1,92 ( $\pm 1,24$ ) ab	0,65 ( $\pm 0,29$ ) a
	Nativo	1,37 ( $\pm 0,25$ ) a	0,62 ( $\pm 0,07$ ) a	0,37 ( $\pm 0,03$ ) a
MPC	Arado	1,33 ( $\pm 0,44$ )	0,81 ( $\pm 0,51$ ) a	0,54 ( $\pm 0,11$ )
	Arado + AH	1,53 ( $\pm 0,83$ )	1,11 ( $\pm 0,83$ ) a	0,84 ( $\pm 0,37$ )
	Nativo	81,57 ( $\pm 84,50$ )	57,61 ( $\pm 51,94$ ) b	N.D.

Promedio  $\pm$  DS; letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ).

En la condición de tensión mátrica del suelo de -33 kPa se encontraron diferencias estadísticamente significativas dentro de la Serie RLV para las tensiones de suministro de -1 y -3 hPa, lo que se encuentra dentro de lo esperado para los tratamientos, dado los contenidos de MO. En cambio, en la tensión de suministro de -5 hPa no se encontraron diferencias entre los tratamientos, e incluso, el valor del índice de repelencia mayor se encontró en el tratamiento T1. Esto es dado por el aumento gradual de la tensión de suministro de agua, la que provocó que los poros más finos tengan una mayor función dentro de la infiltración del agua en el perfil, y dado que la distribución de tamaños de poros de esta Serie presentan valores similares entre los tratamientos (Cuadro 3), los niveles de repelencia también fueron similares. Cabe destacar que los valores obtenidos de repelencia en esta Serie se encuentran dentro del rango de suelo hidrófilo (Hallett *et al.*, 2001), dado que su valor está bajo el nivel de 1,95.

El no presentar repelencia al agua se puede interpretar como una ventaja, sin embargo es importante considerar la relación entre velocidad de humectación y estabilidad de los agregados, con el consecuente efecto en la estructura del suelo en relación al agua aplicada a través del riego. Dentro de estas mismas condiciones de tensión mátrica de suelo, en la Serie MPC no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en las tres tensiones de suministro de agua; a pesar de esto, la tensión de suministro de -1 y -5 hPa son las que mejor se adaptaron a lo esperado según los tratamientos, en que el índice R aumentó a medida que aumentó el contenido de MO del suelo. Condición contraria se dio en la tensión de suministro de -3 hPa, donde los valores mayores de repelencia se encontraron en los tratamientos arados.

A diferencia de la Serie RLV, en la Serie MPC se encontraron valores de repelencia que denotan un suelo repelente al agua, es decir, con un valor sobre el límite de 1,95. En el caso de la tensión de suministro de -1 hPa, se ve un aumento gradual de la repelencia en función del contenido de MO, pasando de una condición hidrófila en el tratamiento T0, a hidrófoba subcrítica en T1, lo que asegura una buena estabilidad frente al agua sin generar una repelencia excesiva (Hallett, 2008), terminando en una condición de repelencia al agua alta en T2, siendo la mayor dentro de esta Serie en esta condición de humedad del suelo. Esto muestra la alta dependencia que puede llegar a tener la repelencia al agua con el contenido de materia orgánica (Hallett, 2008). En el caso de la tensión de suministro de -3 hPa, los tratamientos arados (T0 y T1) se clasifican como suelos hidrófobos subcríticos, mientras que el tratamiento T2 como hidrófilo. Finalmente, en la tensión de suministro de -5 hPa los valores obtenidos se encuentran por debajo de 1,95, por lo tanto los tres tratamientos se consideran hidrófilos, presentando valores similares entre los tratamientos y con un claro indicio que la hidrofobicidad está presente mayormente en el sistema macroporoso.

En condición de suelo seco, en la Serie RLV se aprecian diferencias estadísticamente significativas en las tres tensiones de suministro, dentro de las cuales resalta el T0 con los valores mayores de R. Los valores de R en estas condiciones fueron contrarios a lo esperado en las tres tensiones de suministro, donde se esperaba un aumento de la repelencia en función del aumento de la MO. Los suelos arados (T0 y T1) presentaron valores mayores en comparación con los valores obtenidos en la condición de suelo húmedo,

recalcando que al igual que el método de laboratorio (Cuadro 5), existe una influencia del contenido de agua del suelo sobre el índice de repelencia R. En cuanto al sitio nativo, que disminuyó los valores de R al pasar de una condición húmeda a una seca, es posible que el secado intenso del suelo haya generado microgrietas que favorecieron la infiltración de agua, evitando la manifestación de la hidrofobia (Orellana, 2010).

En relación a la Serie MPC, se alcanzaron niveles de repelencia al agua muy altos en los tratamientos nativos en las tensiones de suministro de -1 y -3 hPa, donde además, su rango de variación es también alto, generando una baja certeza en los valores presentados para este tratamiento. A pesar de esto, se observó una diferencia entre los tratamientos arados y el tratamiento nativo, con diferencias estadísticamente significativas en la tensión de suministro de -3 hPa. En la tensión de suministro de -5 hPa el índice R del sitio nativo fue catalogado como no determinado (N.D.), debido a que la tasa de infiltración del agua fue nula (Cuadro 4), generando un valor cero de velocidad de infiltración y matemáticamente infinito de repelencia al agua.

En un suelo humectable y seco, la tasa inicial de infiltración de agua es alta, debido a las altas fuerzas de atracción que se generan entre el sólido y el agua, pero en suelos que presentan materiales repelentes al agua, a pesar de estar en condición de suelo seco, disminuye notoriamente esta tasa de infiltración, generando valores de hidrofobia mayores en condición seca que en una condición de suelo húmedo (Jaramillo, 2006). Sin embargo, varios estudios (Doerr *et al.*, 2000; Dekker y Ritsema 1994, 1995, 2000) registran altos valores de humedad almacenada en suelos que presentaron repelencia al agua, estableciéndose un *contenido crítico de humedad* para que se presentara la repelencia, la cual es definida como el contenido de agua que presenta el suelo, por debajo del cual se manifiesta repelencia al agua y por encima del cual es humectable. Basado en el concepto de Dekker y Ritsema (1994) se generó la “zona de transición del contenido de agua crítico del suelo”, dentro del cual se encuentran las muestras que pueden ser humectables o repelentes al agua (Dekker *et al.*, 2001b).

A diferencia de la tendencia marcada en la Serie RLV y en las mediciones de laboratorio, donde se muestra un aumento del índice de repelencia en relación al cambio de suelo húmedo a seco, en la Serie MPC no se dio tal reacción, generando inclusive el efecto contrario, donde los valores mayores de R se dieron en la condición de suelo húmedo. Cabe destacar que las mediciones en terreno están sujetas a presentar mayores errores, dada la influencia de otros factores involucrados, los que se encuentran excluidos, en su mayoría, en las mediciones de laboratorio.

### **Efecto de la materia orgánica sobre el índice de repelencia (R)**

La presencia de materia orgánica (MO) en el perfil es clave para la aparición de hidrofobia en los suelos, debido principalmente a la presencia de compuestos apolares que se producen durante su mineralización y que cubren la superficie de los minerales. Con el aumento de estos compuestos, particularmente los polisacáridos, hidrocarburos alifáticos y ácidos

grasos, se incrementa la estabilidad de los agregados del suelo y la capacidad de retención de agua (Hue, 1995; Savage *et al.*, 1969), pero el efecto en la conductividad hidráulica dependerá del tipo de residuo (Singh y Das, 1992; Chenu *et al.*, 2000; Ellies *et al.*, 2003).

Es reconocido que la repelencia al agua del suelo es una función del tipo de MO incorporada en él, y que la MO induce la repelencia al agua por diversos medios, como los que se señalan a continuación (Dekker y Ritsema, 2003):

- Los procesos de secado irreversibles en la MO pueden inducir la repelencia al agua, principalmente en las capas superficiales de suelos de turba.
- Lixiviados de sustancias orgánicas de desechos vegetales pueden inducir repelencia al agua en arenas y otros suelos de grano grueso.
- Productos hidrofóbicos microbiales revisten las partículas minerales del suelo e inducen resistencia a la humectación.

Las sustancias orgánicas inducen una severa repelencia al agua, especialmente en suelos arenosos, pero diversos estudios señalan que también se puede encontrar hidrofobicidad en suelos con texturas pesadas (Wallis y Horne, 1992; Mcghie y Posner, 1980; Chenu *et al.*, 2000).

Dado esto, el contenido de carbono orgánico en el suelo permitiría predecir la repelencia al agua, aunque en algunos casos solo una pequeña proporción de las variaciones en la hidrofobia puede ser explicada solo por las concentraciones totales de carbono orgánico. Se debe tomar en cuenta que no todo el carbono es hidrofóbico, por lo tanto, conocer el tipo de carbono orgánico ayuda a obtener mejores relaciones entre este y la hidrofobia de los suelos (Harper *et al.*, 2000). Sin embargo, las metodologías de fraccionamiento de MO son largas, caras y engorrosas, por lo que en este estudio solo se midió la MO total.

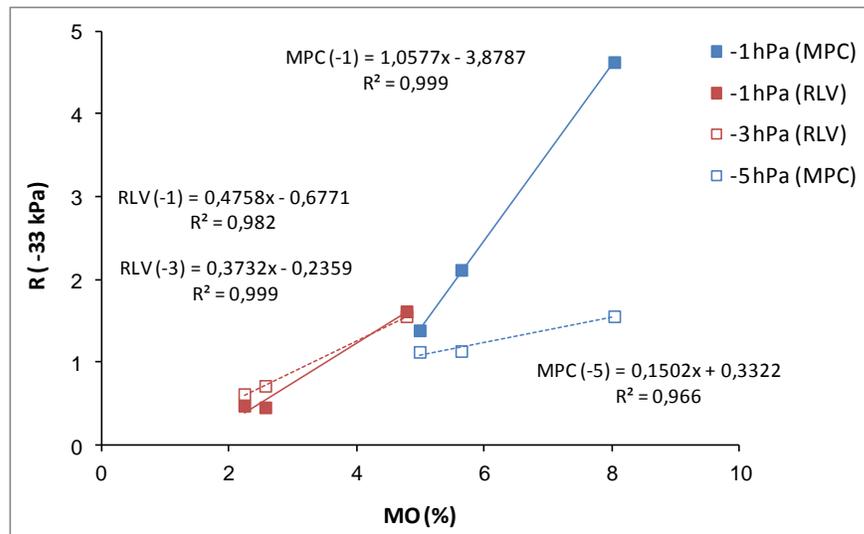
En los Apéndices 8 y 9 se presenta el efecto que tuvo la MO sobre el índice de repelencia (R) tanto en las mediciones de laboratorio como de campo para las Series RLV (Apéndice 8) y MPC (Apéndice 9). Como se aprecia en estos Apéndices, hubo una baja correlación entre la MO y el índice de repelencia (R) medido en laboratorio para ambas Series, indistintamente la condición de humedad, relacionado básicamente a lo dispar que fue el comportamiento de este índice (Cuadro 5) y a las bajas diferencias estadísticas entre los tratamientos arados y el nativo. Es esperable que la MO de estos suelos incremente la producción de polisacáridos a partir de las raíces de las plantas como de la microflora edáfica, en el caso del tratamiento nativo. Estos polisacáridos, poseen propiedades químicas y físicas que favorecen la estructura del suelo, al generar agregados estables; como resultado se obtiene una menor restricción para el flujo de agua, incrementando la infiltrabilidad (Cortés, 2011).

En relación a las correlaciones en las mediciones en terreno, en ambas Series en la condición de suelo seco no hubo una correlación significativa, generándose en el caso de la

Serie RLV correlaciones inversas en las tres tensiones de suministro, esto es, a medida que aumentó la MO disminuyó el índice de repelencia. En el caso de la Serie MPC, a pesar de tener correlaciones significativas, los valores del índice de repelencia en el tratamiento T2 (Nativo) presentaron rangos altísimos de variación, lo que los hace poco confiables para cualquier relación.

Un factor que puede explicar esta situación es la calidad de la MO que se encuentra en la Serie, dado que a pesar que los compuestos hidrofóbicos que causan la repelencia al agua son de naturaleza orgánica, no es la cantidad, sino el tipo de MO del suelo lo que hace que se manifieste la repelencia al agua (Jaramillo, 2006). Otro factor que se relaciona con la disminución de la repelencia al agua en función del aumento de la MO, es la generación de micro grietas al momento de encontrarse el suelo en condición de suelo seco, las que generan flujos preferenciales de fluidos, haciendo disminuir la repelencia al agua (Orellana, 2010). A pesar que el tratamiento T2 se relaciona con una abundante hojarasca presente sobre la superficie del suelo, los valores de repelencia y de MO se encuentran dentro de rangos menores a los que podrían llegar a presentar, tal como lo determinó Czarnes *et al.* (2000) en el que el aporte de sacáridos bacteriales incluso pueden llegar a generar valores de R infinitos. Así, los valores de repelencia podrían ir en aumento si estas condiciones de MO continúan, pudiendo provocar problemas de infiltración y distribución irregular del agua de riego (Ellies *et al.*, 1996). Esto ocurre porque los grupos orgánicos apolares cubren las partículas minerales, generando una menor adhesión del agua hacia los sólidos (Bachmann y Van der Ploeg, 2002).

Finalmente, en la condición de suelo húmedo (-33 kPa) se encontraron las correlaciones más significativas, a tensiones de suministro de -1 y -3 hPa en la Serie RLV y -1 y -5 hPa en la Serie MPC, resultados que se presentan en la Figura 8.



**Figura 8.** Efecto de la materia orgánica (MO) en el índice de repelencia (R) para ambas Series de suelo en condición de suelo húmedo (-33 kPa) y distintas tensiones de suministro.

Como se ve en la Figura 8, existe una correlación entre la materia orgánica y el índice de repelencia para los suelos estudiados. Para estas variables, la correlación más alta ( $R^2=0,99$ ) se dio en la Serie MPC con una tensión mátrica de -33 kPa y tensión de suministro de -1 hPa, con una clara relación en estas mismas condiciones para la Serie RLV ( $R^2=0,98$ ). Otra buena correlación se logró en las tensiones de suministro de -3 hPa en la Serie RLV y de -5 hPa en la Serie MPC, con valores de  $R^2$  de 0,99 y 0,97 respectivamente.

Comparativamente, en estudios previos realizados en Andisoles, Histosoles y Ultisoles en la zona Sur de Chile, se plantean correlaciones entre la MO y el índice R en tensiones mátricas de -33 y -3000 kPa (Orellana, 2010). Se debe tomar en cuenta que los suelos utilizados en este estudio son de distinta mineralogía y presentan distinto contenido de materia orgánica; a pesar de esto, se confirma la relación que presenta el aumento del índice R en función de la MO.

Los sitios nativos con el método *in situ* presentaron características altamente hidrófobas en la Serie MPC para la condición de suelo seco, además de una condición medianamente hidrófoba en el suelo húmedo con una tensión de suministro de -1 hPa (Cuadro 6). A pesar de esto, la correlación presentada en la Figura 8 fue la que mejor se adecuó a un comportamiento lineal de aumento de repelencia en función de la MO. En esta metodología también hubo un efecto dispar con la aplicación de ácido húmico en el suelo, generando valores de repelencia esperados en la Serie MPC, excepto en la tensión de suministro de agua de -3 hPa en condición de suelo húmedo, y en el caso de la Serie RLV solo en las tensiones de suministro de -3 y -5 hPa en condición de suelo húmedo.

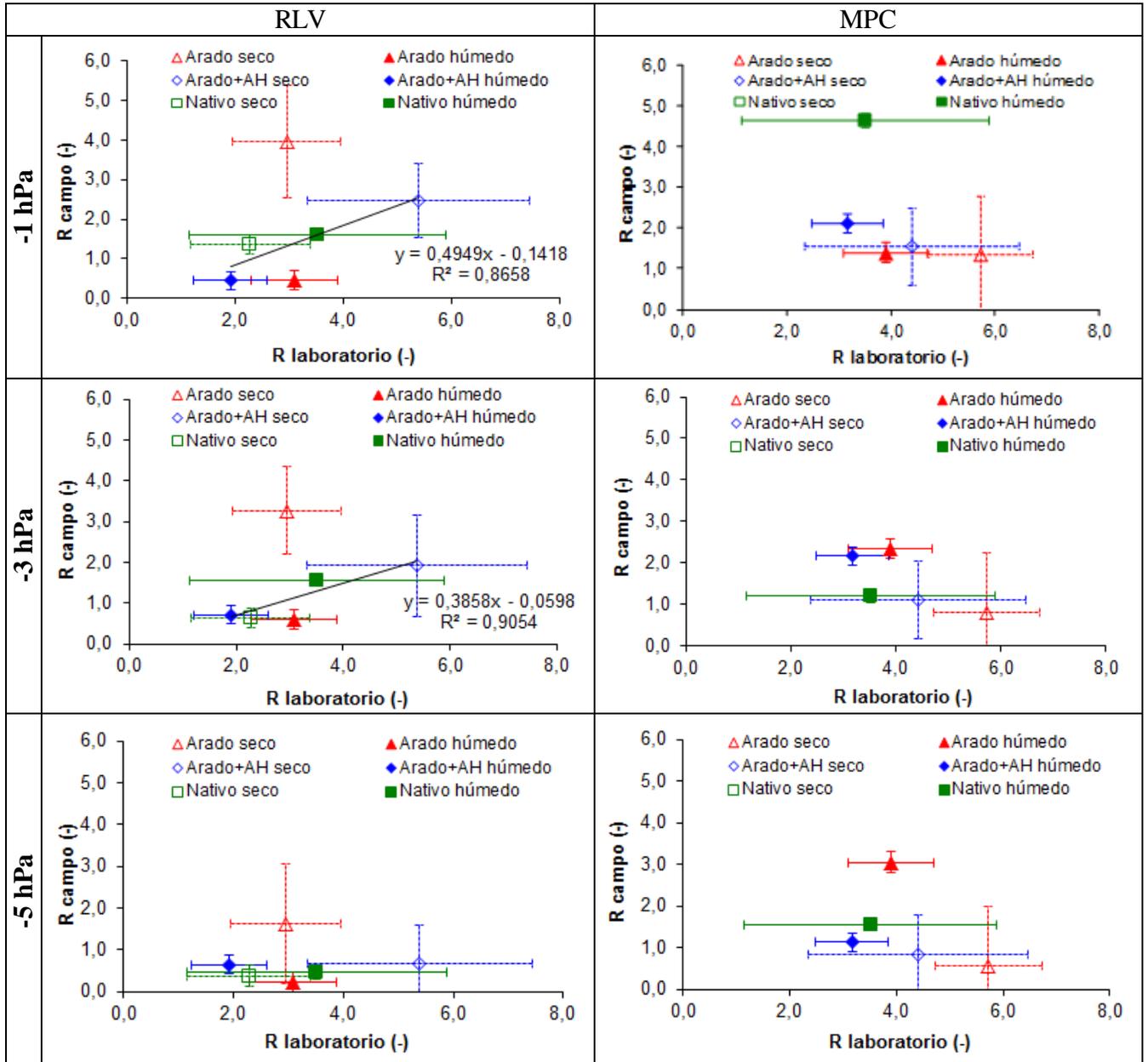
### **Correlación entre índice de repelencia (R) *in situ* y el índice de repelencia (R) de laboratorio**

Considerando que los resultados del índice de repelencia obtenidos tanto en laboratorio como en terreno se agrupan dentro de los mismos criterios de medición, es de esperar que la correlación entre ambos métodos sea directa, dependiendo del contenido de agua del suelo, materia orgánica, textura u otros factores.

Al comparar los valores obtenidos en los Cuadros 5 y 6, se aprecia que el método de campo o *in situ* en general subestima el índice R en relación al método de laboratorio, especialmente en la condición de tensión mátrica del suelo de -33 kPa. Esta subestimación llega al punto de considerar en el método de campo a un tratamiento como hidrófilo, mientras este mismo tratamiento es catalogado como hidrófobo con el método de laboratorio. A su vez, el método de campo presentó un menor rango de variación entre sus promedios comparándolo con el método de laboratorio.

En el Apéndice 10 se presentan las correlaciones entre el índice de repelencia (R) medido en laboratorio y el medido en campo o *in situ* para ambas Series de suelo y condiciones de medición, considerando las repeticiones a partir de las unidades experimentales. En él se

puede apreciar que no hubo una relación clara entre el índice de repelencia (R) de laboratorio y de campo dentro de los tratamientos planteados, presentando incluso relaciones inversas (como en el tratamiento Arado + AH con tensión de suministro de -3 hPa en condición de suelo seco de la Serie MPC). A pesar de esto, al considerar el promedio de las repeticiones, existieron condiciones dentro de las cuales se generaron correlaciones significativas entre los métodos, resultados que se presentan en la Figura 9.



**Figura 9.** Relación entre el índice de repelencia (R) medido en laboratorio y en campo. -1, -3 y -5 hPa corresponden a tensiones de suministro de los líquidos infiltrantes (agua y etanol) en el método de campo. El sitio arado del suelo RLV (triángulo) fue excluido del ajuste.

En la Serie MPC no se logró una tendencia significativa entre los tratamientos dentro de cada tensión de suministro, generando inclusive tendencias negativas. Esto fue generado por el bajo valor del índice R de campo dentro de los tratamientos en condición de suelo seco comparado con el índice R de laboratorio, dado el alto ingreso de agua que presentó esta Serie en la condición de suelo seco (Cuadro 4) siendo uno de los más altos dentro de todo el ensayo. Esta alta tasa de infiltración de agua catalogó al suelo, evaluado con el método de campo, como hidrófilo, mientras que en el método de laboratorio resultó ser hidrófobo, condición que no permitió generar una buena correlación entre ambos métodos. Cabe destacar que los tratamientos nativos (T2) en condición de suelo seco se encuentran fuera de rango (Cuadro 6) de los gráficos de la Figura 9, condición que no afectó el análisis de la correlación.

En el caso de la Serie RLV, existen correlaciones significativas entre los métodos de medición del índice R dentro de las tensiones de suministro de líquidos de -1 y -3 hPa, tendencias positivas con valores de  $R^2$  de 0,87 y 0,91 respectivamente. Estas tendencias se lograron al excluir como factor al tratamiento arado (T0), alcanzando una correlación significativa entre los métodos en condiciones de suelo estabilizado, ya sea con ácido húmico o condiciones naturales de MO, como el caso de este ensayo, indistintamente la condición de humedad del suelo, sin embargo, el método de campo presenta una menor sensibilidad al manejo, dado por las pendientes menores a 0,5 en los ajustes.

La presencia de MO favorece la estabilidad al agua, ya sea por una acción cementante en los puntos de contacto o por su repelencia al agua, lo que reduce la velocidad de humectación de los agregados (Chenu *et al.*, 2000). En este ensayo, la Serie RLV presentó altos contenidos de MO (Cuadro 2) en relación a su clase textural franco arenosa y alta resistencia a la humectación en las mediciones del índice R de laboratorio (Cuadro 5), lo que se traduce en agregados más estables. En condiciones de campo, los eventos de secado intenso agrupan a las partículas, provocando una re-humectación lenta y dificultosa, generándose un frente de humectación disparejo, con zonas de flujos preferenciales en profundidad y zonas de lenta infiltración en superficie. Así, bajo estas condiciones, es posible medir la repelencia al agua a través del índice R con el uso del minidisco infiltrómetro, tomando en cuenta que el método de laboratorio es más sensible a las distintas condiciones de manejo. A pesar de esto, la variabilidad de los resultados es alta en ambos métodos, debiendo aumentar el número de repeticiones para una adecuada caracterización.

## CONCLUSIONES

Los Suelos de las Series Mapocho (MPC) y Rinconada Lo Vial (RLV) presentan características pedológicas que favorecen la presencia de hidrofobia en los suelos. Dentro de las características importantes identificadas se encuentra el cambio significativo del contenido de materia orgánica (MO), con valores mayores en los sitios nativos, el cual disminuye la capacidad de humectación de los suelos debido principalmente a la presencia de compuestos apolares, que se producen durante su mineralización y que cubren la superficie de los minerales.

El índice de repelencia (R) aumenta en función de la cantidad de materia orgánica en ambos métodos utilizados. Sin embargo, la mejor correlación se logró a tensiones mátricas de -33 kPa con tensiones de suministro de -1 y -3 hPa en la Serie RLV y -1 y -5 hPa en la Serie MPC.

El índice R tiende a acentuarse con el secado del suelo en ambas metodologías. Este incremento de R a tensiones mayores (-3000 hPa) se manifiesta más claramente con las mediciones de laboratorio para ambas Series; sin embargo, pueden existir otros factores que influyen en su evaluación, como lo es el tipo y la condición de la materia orgánica.

El método *in situ* del índice de repelencia medido con el minidisco infiltrómetro correlaciona bien con el índice de repelencia de laboratorio presentando una tendencia lineal en la Serie RLV (Inceptisol) con tensiones de suministro de líquidos de -1 y -3 hPa, indistintamente de la condición de humedad del suelo. Esta correlación no se dio en la Serie MPC, por lo que es necesario continuar estudiando los factores de los cuales depende la hidrofobia de agua por parte del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Bachmann, J. and R.R. Van der Ploeg. 2002. A review on recent developments in soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 165: 468-478.
- Bisdorf, E.B., L.W. Dekker and J.F. Th. Schoube. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* 56: 105-118.
- Blume, T., E. Zehe and A. Bronstert. 2007. Use of soil moisture dynamics and patterns for the investigation of runoff generation processes with emphasis on preferential flow. *Hydrology and Earth System Sciences-Discussions*, 4: 2587-2624.
- BM (Banco Mundial). Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Región para América Latina y el Caribe. ONU (Organización de Naciones Unidas), Chile. 2011. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Chile: DGA. 88 p.
- Bodí, M.B., S.H. Doerr, A. Cerda and J. Mataix-Solera. 2012. Hydrological effects of a slayer of vegetation ash on underlying wetttable and water repellent soil. *Geoderma*, 191: 14-23.
- Brady, N., and R. Weil. 1999. Elements of the nature and properties of soils. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. USA. 559 p.
- Burch, G., I. Moore and J. Burns. 1989, jul/sep. Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Hydrological Processes*, 3: 211-222.
- Capriel, P., T. Beck, H. Borchert, J. Gronholz and G. Zachmann. 1995. Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 1453-1458.
- 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.
- Casanova, M., O. Seguel, J. Haberland y C. Kremer. 2008. Propiedades físicas: Indicadores de calidad y salud de suelos. *Antumapu* 6 (1-2): 32-34.
- Casanova, M., O. Seguel, A. Joel, I. Messing, W. Luzio y W. Vera. 2003. Funciones de pedotransferencia para conductividad hidráulica en laderas de secano. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 3: 42-48.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais and D. Arrovays. 2000. Organic mater influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1479-1486.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana: Descripción de suelos, materiales y símbolos. (Pub. N°115), CIREN. Santiago, Chile: CIREN. 425p.
- Clothier, B.E. and I. White. 1981. Measurement of sorptivity and soil diffusivity in the field. *Soil Science Society of America Journal*, 117: 311-314.

- Cortés, A. 2011. Estabilización física de camellones con paltos vía enmiendas orgánicas/cultivo de cobertura. IV Región de Chile. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 45 h.
- Czarnes, P., D. Hallett, A.G. Bengough and M. Young. 2000. sep. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 51: 435-443.
- Dane, J.H. and J.W. Hopmans. 2002. Water retention and storage. pp: 717-720. In: Dane, J. H. and Topp, G. C. (ed.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. USDA. Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PSW-46. California. 21 p.
- DeBano, L.F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology*. 231-232: 4-32.
- Dekker, L.W. 1998. Moisture variability resulting from water repellency in Dutch soils. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- Dekker, L.W., K. Oostindie and C.J. Ritsema. 2001a. The impact of water repellency on soil moisture variability and preferential flow. *International Turfgrass Society Research Journal*, 9: 498-505.
- Dekker, L.W., S.H. Doerr, K. Oostindie, A.K. Ziogas and C.J. Ritsema. 2001b. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1667-1674.
- Dekker, L. and C.J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*. 30(9): 2507-2517.
- Dekker, L. and C.J. Ritsema. 1995. Fingerlike wetting patterns in two water-repellent loam soils. *Journal of Environmental Quality*, 24: 324-333.
- Dekker, L. and C.J. Ritsema. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soil. *Journal of Hydrology*, 231-232: 148-164.
- Dekker, L. and C.J. Ritsema. 2003. Wetting patterns in water repellent Dutch soils. In: Ritsema, C.J. and Dekker, L.W. (ed.) Soil Water Repellency, Occurrence, Consequences and Amelioration: 151-166.
- Dirkssen, C. 1999. Soil physics measurements. GeoEcology paperback. Reiskirchen, Germany. Catena, 154 p.
- Doerr, S.H., R.A. Shakesby and R.P.D. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science* 51: 33-65.
- Doerr, S.H. and A.D. Thomas. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, 231-232: 134-147.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. In Defining Soil Quality for a Sustainable Environment; Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A., ed., Soil Science Society of America, 3-21 p.
- Ellies, A., 1988. Mechanical consolidation in volcanic ash soils. In J. Drescher, R. Horn, M. de Boodt: Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement 11, Hannover, 87-92 p.

- Ellies, A., R. Grez y C. Ramírez. 1995. Potencial de humectación y estabilidad estructural de los agregados de suelos sometidos a diferentes manejos. *Agricultura Técnica* (Chile) 55 (3-4): 220-225.
- Ellies, A., R. Grez y C. Ramírez. 1996, ene/jun. 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. and M. Hartge. 1990. Changes in soil structure as caused by land use after clearing virgin forest. *Z. F. Bodenkunde und Pflanzenernährung*. 153: 389-393.
- 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., C. Ramirez and R. Mac Donald. 2003. Wetting capacity distribution in aggregates from soils with a different management. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 1(2): 229-233.
- Feng, G., J. Letey and L. Wu. 2000. The influence of two surfactants on infiltration into a water-repellent soil. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 361-367.
- Fernández, P. 2013. Cambio en las propiedades físicas de un suelo con camellones tratados con dos fuentes ácidas, V Región de Chile. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 30 h.
- Flint., A.L. and L.E. Flint. 2002. Particle density. pp: 229-240. In: Dane, J. H. and G.C. Topp (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America, Book Series Nr 5. 1692 p.
- Foster S.S.D. and P.J. Chilton. 2003. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 358: 1957-1972.
- Gee, G. W. and D. Or. 2002. Particle size analysis. pp: 255-293. In: Dane, J. H. and Topp, G.C. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America, Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- Godefrois, S. and N. Koedam. 2010. Tree-induced soil compaction in forest ecosystems: myth or reality?. *European Journal of Forest Research*, 129: 209-2017.
- Gómez, F. 2008. Efecto de un surfactante de riego en combinación con ácidos fúlvicos sobre el flujo de agua en un suelo de texturas gruesas regado por goteo. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 38 h.
- Grossman, R.B. and T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. pp: 201-228. In: Dane, J. H. and G.C. Topp (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America, Book Series Nr 5. 1692 p.
- Hallett, P. 2008. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency - A review. *Soil and Water Research*, 3(1): 521-529.
- Hallett, P., T. Baumgartl, and I. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Journal of Soil Science*, 65:184-190.
- Hallet, P. and I. Young. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*, 50: 35-40.

- Harper, R., I. Mckissock, R. Gilkes, D. Carter and P. Blackwell. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and land use on water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232: 371-383.
- Hartge, K. and R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden: Praxis, Messmethoden, Auswertung. 4te ed. Stuttgart, Germany: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 178 p.
- Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press. San Diego, USA. 771 p.
- Horn, R. 1994. The effect of aggregation of soils on water, gas and heat transport. In: E.D. Schulze: Flux Control in Biological Systems. Academic Press. 220 p.
- 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(5): 1455-1459.
- Hue, N.V. 1995. Sewage sludge. pp: 199-235. In: Reichcigl, J. (Ed.). Soil amendments and environmental quality. Soil and Water Science Department, University of Florida. 528 p.
- Imeson, A., J. Verstraten, E. Van Mulligen and J. Sevink. 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under mediterranean type forest. *Catena*, 19: 345-361.
- Jaramillo, D. 1992. Relación entre la acumulación de acículas (litter) de *Pinus patula* y la hidrofobicidad en algunos Andisoles de Antioquia. Tesis Magister en Suelos y Aguas. Palmira, Colombia: Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia. 95 h.
- Jaramillo, D. 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30 (115): 215-232.
- Jaramillo, D., L.W. Dekker, C.J. Ritsema and J.M.H. Hendrickx. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231-232: 105-111.
- Jarvis, N.J. and I. Messing. 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 27-34.
- Jury, W.A and R. Horton. 2004. Soil Physics. Sixth Edition. John Wiley & Sons Inc. New Jersey, USA. 370 p.
- Kay, B. and D. Angers. 2002. Soil structure. (pp. 249-283). In: Warrick, A. (ed.). Soil Physics Companion. Boca Raton, USA: CRC Press. 400 p.
- Kehr, E. 1983. Efecto de diferentes enmiendas sobre la evolución de las propiedades físico-hídricas de un suelo arcilloso. Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral. 67 h.
- Lado, M., A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 68:234-242.
- Lal, R. 1994. Soil erosion: research methods. 2nd ed. Florida, USA: Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. 340 p.
- Lal, R. and M. Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. 1st ed. Boca Raton, USA: CRC Press. 528 p.
- Le Bissonnais, Y. and D. Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*, 48: 39-48.

- Leeds-Harrison, P., E. Youngs and B. Uddin. 1994. A device for determining the sorptivity of soil aggregates. *European Journal of Soil Science*, 45: 269-272.
- Macghie, D. and A. Posner. 1980. Water repellence of a heavy-textured western Australian surface Soil. *Australian Journal of Soil Research*, 18: 309-323.
- Marín, E. 2011. Estabilización de camellones con cultivo de mandarina (*Citrus reticulata*) mediante el uso de dos fuentes de materia orgánica, IV Región de Chile. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 29 h.
- 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 para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Chillán, Chile: Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. 40 h.
- Olivares, A., M. Johnston y C. Gutiérrez. 2006. Crecimiento y desarrollo de *Bromus berterioanus* (Collar) sometido a diferentes regímenes pluviométricos. *Agricultura Técnica*, 66(2): 166-173.
- Orellana, I. 2010. Comparación de dos métodos para la medición de capacidad de humectación en suelos. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral. 36 h.
- Orellana, I., A. Ellies y O. Seguel. 2004. Variación de la capacidad de humectación de suelos en relación al contenido de materia orgánica. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*. Boletín 20: 399-406.
- 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 N. Vignozzi. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. (pp: 71-82). In: Pagliai, M. and Jones, R. (ed.). Sustainable land management-environmental protection. A soil physical approach. Advances in Geocology 35.
- Pérez, D.V., S.M. Simão y A. Salatino. 1998. Identificação e caracterização da repelencia à água em alguns solos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22: 197-207.
- Perroux, K. and White, I. 1988, sep. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 1205-1215.
- Pfeiffer, M., J. Haberland, C. Kremer y O. Seguel. 2008. Comparación de dos métodos alternativos al pozo barreno para la medición de la conductividad hidráulica saturada (ks) en un Alfisol. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 8 (4): 49-56.
- Potter, K.N., H.A. Torbert and J.E. Morrison, 1995. Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. Trans. ASAE 38:1413-1419.
- Richardson, J.L. and F.D.Hole. 1978. Influence of vegetation on water repellency in selected western Wisconsin soils. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 465-467.
- Ritsema, C.J. and L.W. Dekker. 1996. Water repellency and its role in forming preferred flow paths in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 34: 475-487.
- Ritsema, C.J., F.C. Van Dam, L.W. Dekker and K. Oostindie. 2000. Principles and modeling of flow and transport in water repellent surface layers, and consequences for management. Alterra Progress Report CT98-4027. European Commission DG VI Agricultura. Office, Bruselas, Bélgica. 149 p.

- Robichaud, P. and R. Hungerford. 2000. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology*, 231-232: 207-219.
- Roper, M.M. 2005. Managing soils to enhance the potential for bioremediation of water repellency. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 803-810.
- Rothon, F.E. 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 700-709.
- Roy, J.L. and W.B. McGill. 1998. Characterization of disaggregated nonwetable surface soils found at old crude oil spill sites. *Soil Science of Canada Journal*, 78: 331-334.
- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez y M. Mora. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Manual INIA y CNA de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Serie Actas INIA N° 34. 164 p.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, número 5, 80 p.
- Santibáñez, F. y J. Uribe. 1990. Atlas agroclimático de Chile. Santiago, Chile: Laboratorio de Agroclimatología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. 99 p.
- Savage, S., J. Martin and J. Letey. 1969. Contribution of humic acid and a polysaccharide to water repellency in sand and soil. *Soil Science Society of America, Proceedings*. 33: 149-150.
- Seguel, O., V. García De Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* (Chile) 36(3): 287-297.
- Seguel, O., E. Marín y A. Michaud. 2012. Mejoramiento de propiedades físicas del suelo mediante ácido húmico y rastrojos de trigo. *Red Agrícola* 46: 12-13.
- Shepherd, T.G., S. Saggiar, 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.
- Singh, R. and D. Das. 1992. Wettability of soil under different plants covers. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 40: 39-43.
- Smettem, K.R.J., J.Y. Parlange, P.J. Ross and R. Haverkamp. 1995. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer 3. Parameter estimation using a double-disk tension infiltrometer. *Water Resources Research*, 31: 2491-2495.
- Tilman, D., K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor and S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671-677.
- Tillman R.W., D.R. Scotter, M.G. Wallis and B.E. Clothier. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research*, 27: 637-644.
- Tschapek, M. 1966. El agua del suelo. Nuevas gráficas. Madrid, España. 480 p.
- Urbanek, E., P. Hallet, D. Feeney, R. Horn. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage system. *Geoderma*, 140: 147-155.

- Villarroel, R. 2012. Propiedades químicas de un suelo del secano central de Chile bajo un sistema de agroforestería asociado a cosecha de agua a 12 años de su establecimiento. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 38 h.
- Wallis, M., D. Scotter and D. Horne. 1991. An evaluation of the intrinsic sorptivity water repellency index on range of New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 353-362.
- Wallis, M. and D. Horne. 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science*, 20: 91-139.
- Warrick, A.W. 2002. Soil Physics Companion. CRC Press LLC. Florida, U.S.A. 389 p.
- Wilson, G.V. and E.J. Luxmoore. 1988. Infiltration, macroporosity and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 329-335.

## APÉNDICES

### Apéndice 1

#### Resumen de granulometría en profundidad (10-20 cm) para cada Serie de suelo

Suelos	Manejo	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural (USDA)
		------(%)-----			
<b>RLV</b>	Arado	66,5 (±4,14)	16,8 (±2,29)	16,7 (±1,86)	Fa
	Arado + AH	69,4 (±2,29)	16,2 (±0,85)	14,4 (±1,81)	Fa
	Nativo	65,6 (±0,23)	19,6 (±0,13)	14,8 (±0,10)	Fa
<b>MPC</b>	Arado	47,8 (±0,00)	39,0 (±0,00)	13,2 (±0,00)	F
	Arado + AH	50,4 (±0,51)	36,1 (±1,81)	13,5 (±2,32)	F
	Nativo	56,5 (±9,17)	32,6 (±5,10)	10,9 (±4,24)	Fa

Promedio ± Desviación estándar; dentro de un mismo suelo, no hubo diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey; Fa: Franco arenoso; F: franco.

## Apéndice 2

**Densidad aparente, densidad real y porcentaje de materia orgánica en profundidad (10-20 cm).**

Suelos	Tratamiento	Da	Dr	Materia orgánica
		-----( $\text{Mg m}^{-3}$ )-----		(%)
<b>RLV</b>	Arado	1,42 ( $\pm 0,14$ ) ab	2,58 ( $\pm 0,05$ )	2,47 ( $\pm 0,10$ ) a
	Arado + AH	1,53 ( $\pm 0,07$ ) b	2,61 ( $\pm 0,16$ )	2,60 ( $\pm 0,34$ ) a
	Nativo	1,21 ( $\pm 0,10$ ) a	2,78 ( $\pm 0,02$ )	3,59 ( $\pm 0,43$ ) b
<b>MPC</b>	Arado	1,22 ( $\pm 0,01$ )	2,14 ( $\pm 0,00$ )	5,50 ( $\pm 0,00$ )
	Arado + AH	1,21 ( $\pm 0,06$ )	2,33 ( $\pm 0,33$ )	5,01 ( $\pm 0,60$ )
	Nativo	1,16 ( $\pm 0,50$ )	2,50 ( $\pm 0,51$ )	5,52 ( $\pm 1,82$ )

Promedio  $\pm$  DS; Letras distintas en sentido vertical y en el mismo suelo indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ); Da y Dr: densidad aparente y real, respectivamente.

## Apéndice 3

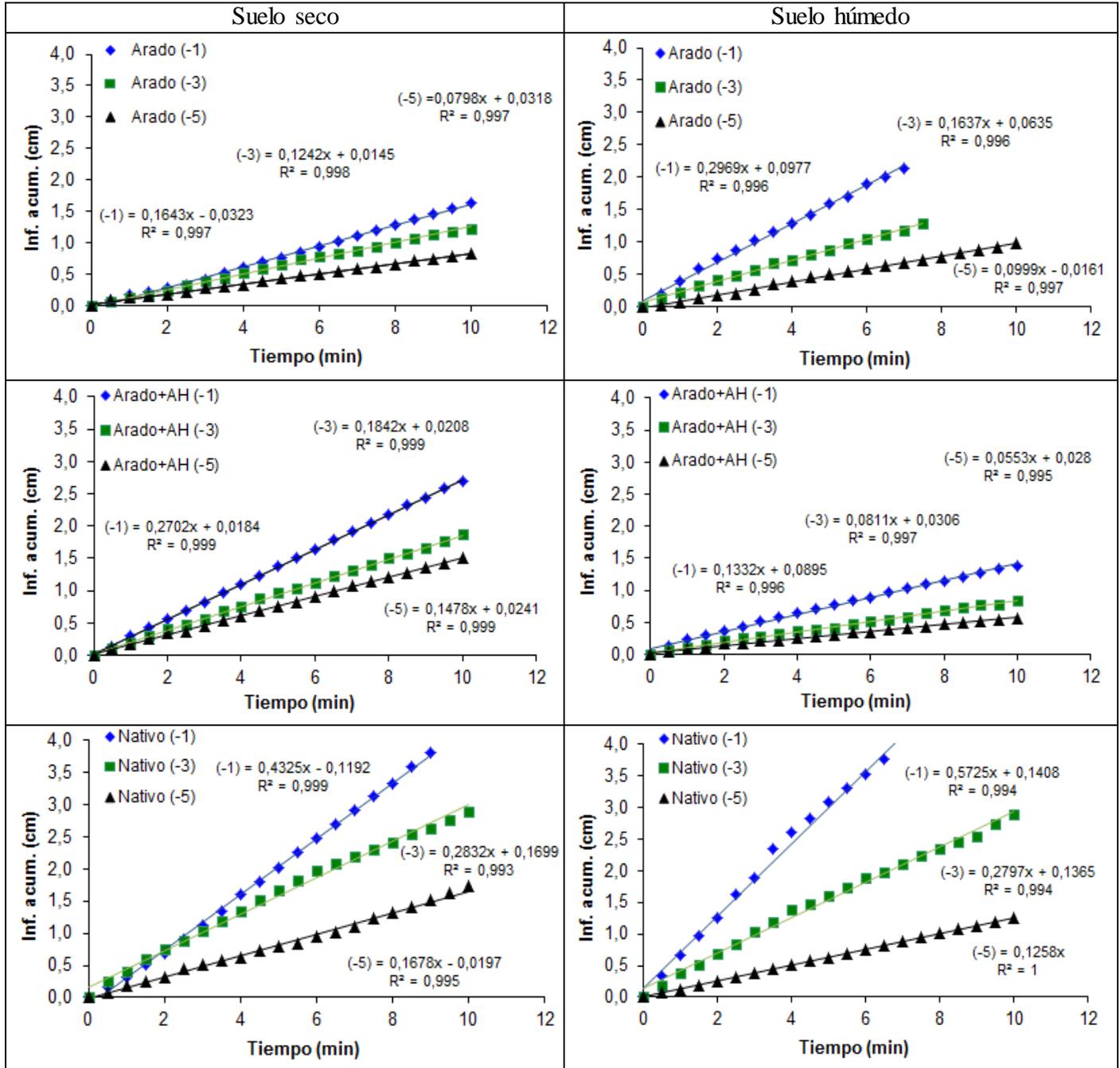
## Distribución volumétrica (%) del tamaño de poros en profundidad (10-20 cm)

Tamaño poro ( $\mu\text{m}$ )	Tratamiento	RLV	MPC
PDR (%) ( $>50 \mu\text{m}$ )	Arado	26,1 ( $\pm 7,6$ )	17,6 ( $\pm 0,1$ ) b
	Arado + AH	21,7 ( $\pm 5,6$ )	17,4 ( $\pm 1,5$ ) b
	Nativo	34,7 ( $\pm 4,3$ )	12,7 ( $\pm 3,0$ ) a
PDL (%) (50 a $>10 \mu\text{m}$ )	Arado	5,4 ( $\pm 7,9$ )	5,2 ( $\pm 0,8$ )
	Arado + AH	9,5 ( $\pm 8,5$ )	8,7 ( $\pm 1,9$ )
	Nativo	4,3 ( $\pm 2,8$ )	5,0 ( $\pm 2,2$ )
PAU (%) (10 a $0,2 \mu\text{m}$ )	Arado	10,3 ( $\pm 2,6$ ) ab	13,3 ( $\pm 5,0$ )
	Arado + AH	14,45 ( $\pm 0,0$ ) b	12,1 ( $\pm 2,6$ )
	Nativo	7,6 ( $\pm 2,4$ ) a	15,7 ( $\pm 10,3$ )
PAI (%) ( $< 0,2 \mu\text{m}$ )	Arado	9,4 ( $\pm 0,7$ )	17,8 ( $\pm 2,6$ ) b
	Arado + AH	9,5 ( $\pm 0,2$ )	15,5 ( $\pm 0,9$ ) ab
	Nativo	9,0 ( $\pm 0,5$ )	13,5 ( $\pm 1,1$ ) a

Promedio  $\pm$  Desviación estándar; letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p < 0,05$ ). PDR, PDL, PAU y PAI: Poros de drenaje rápido, poros de drenaje lento, poros de agua útil y poros de agua inútil, respectivamente.

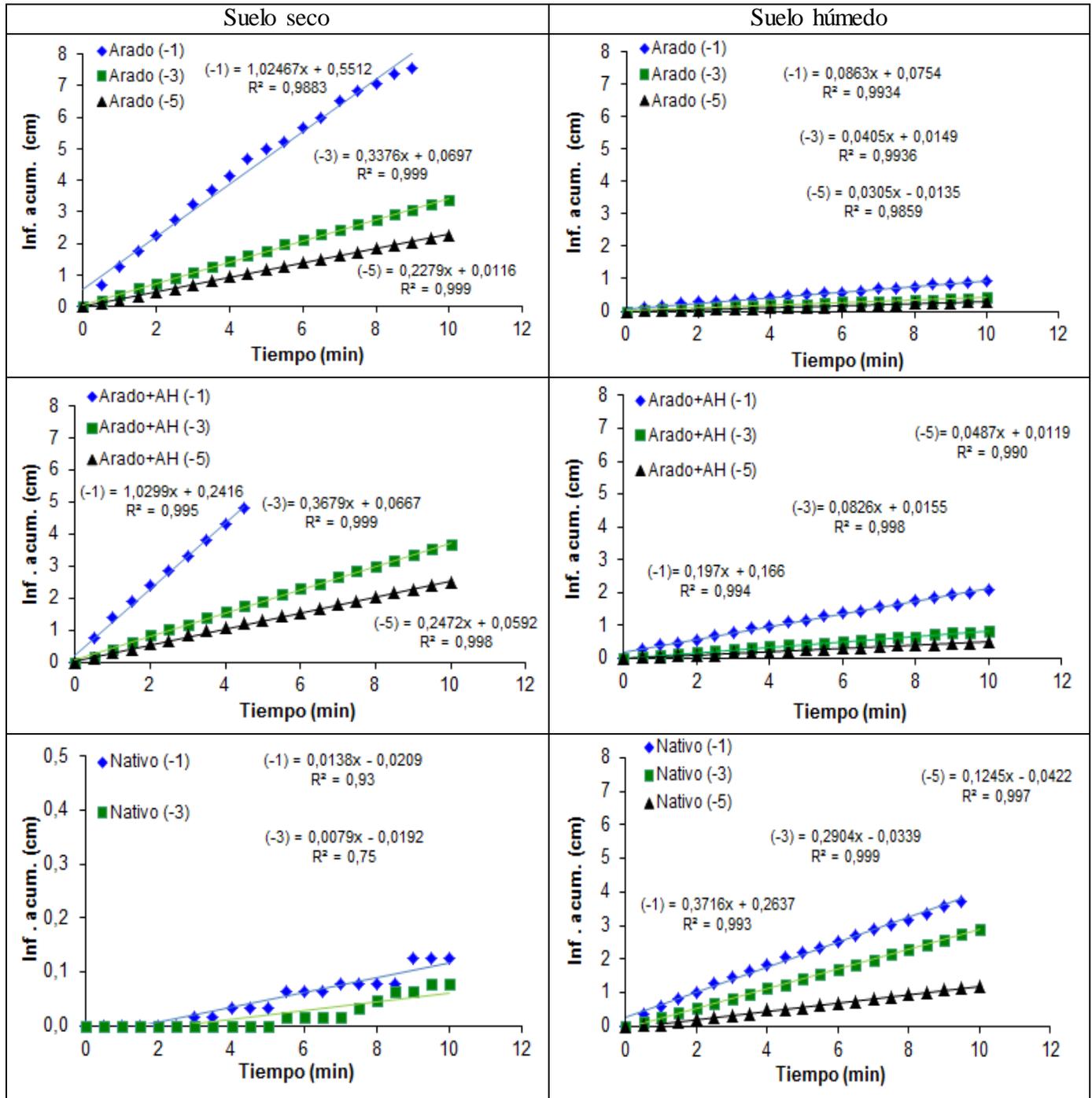
Apéndice 4

Infiltración acumulada (cm) en función del tiempo (min) en Serie RLV



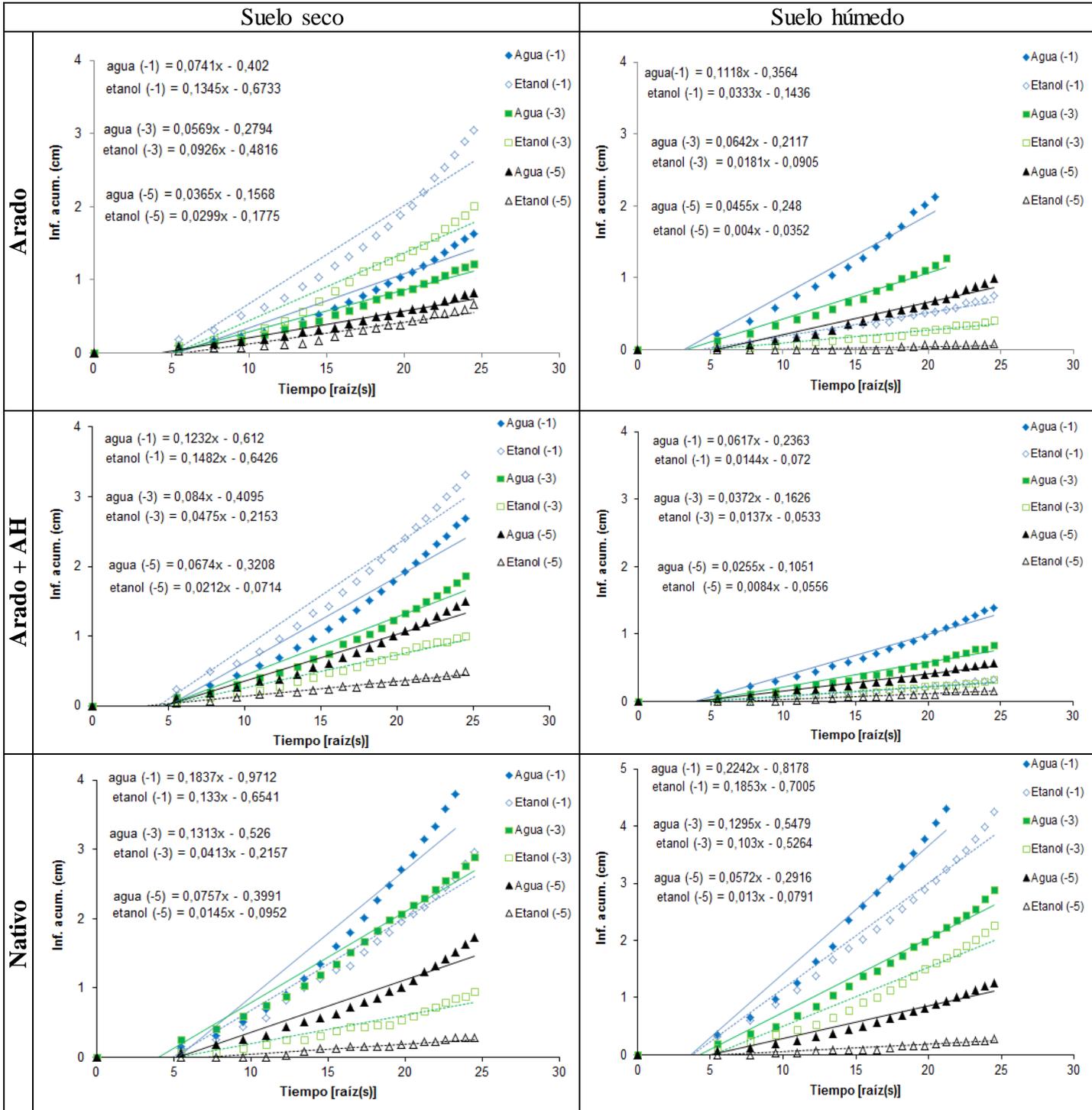
Apéndice 5

Infiltración acumulada (cm) en función del tiempo (min) en Serie MPC



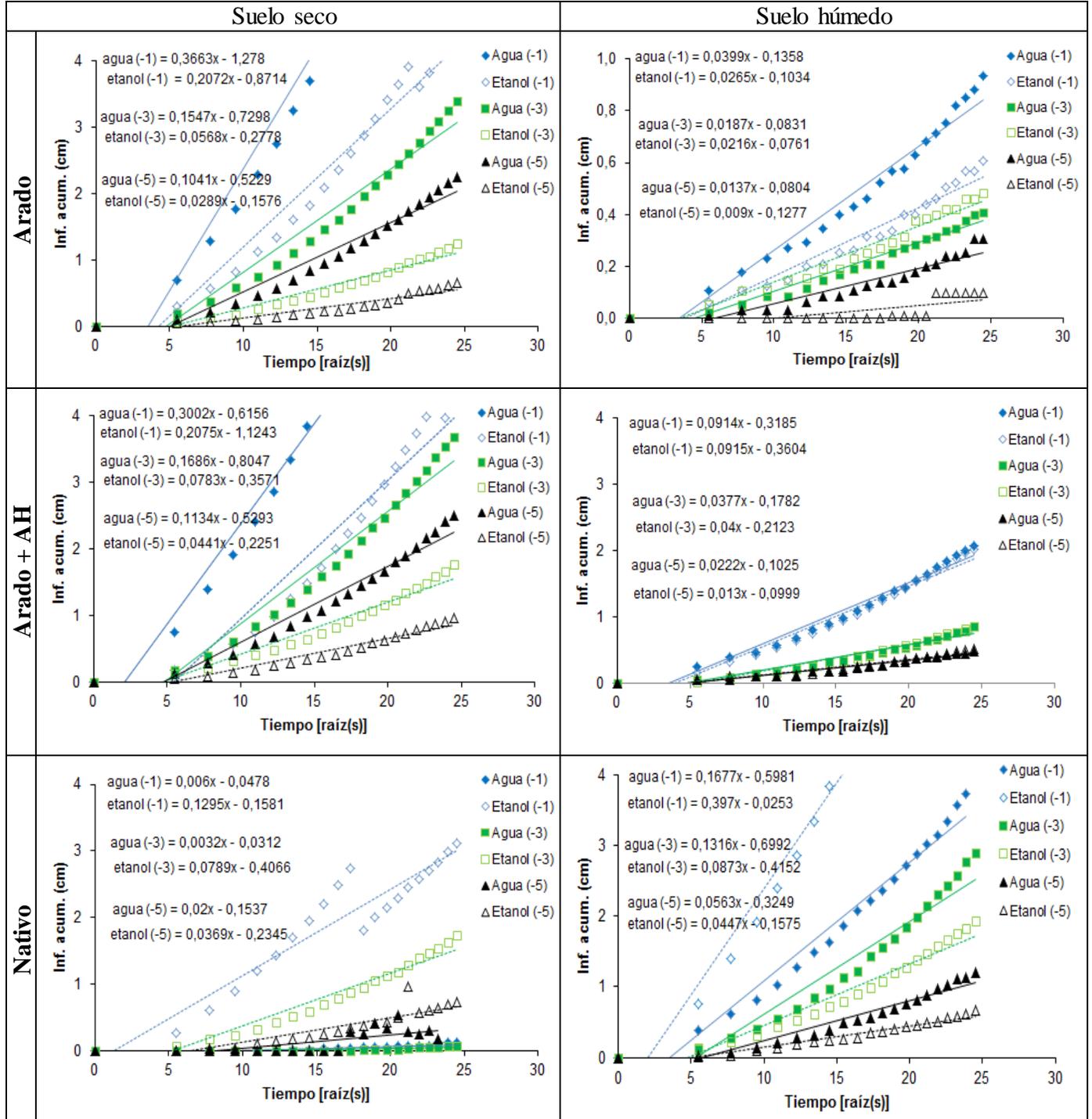
Apéndice 6

Recta de sortividad (promedio) de la Serie RLV



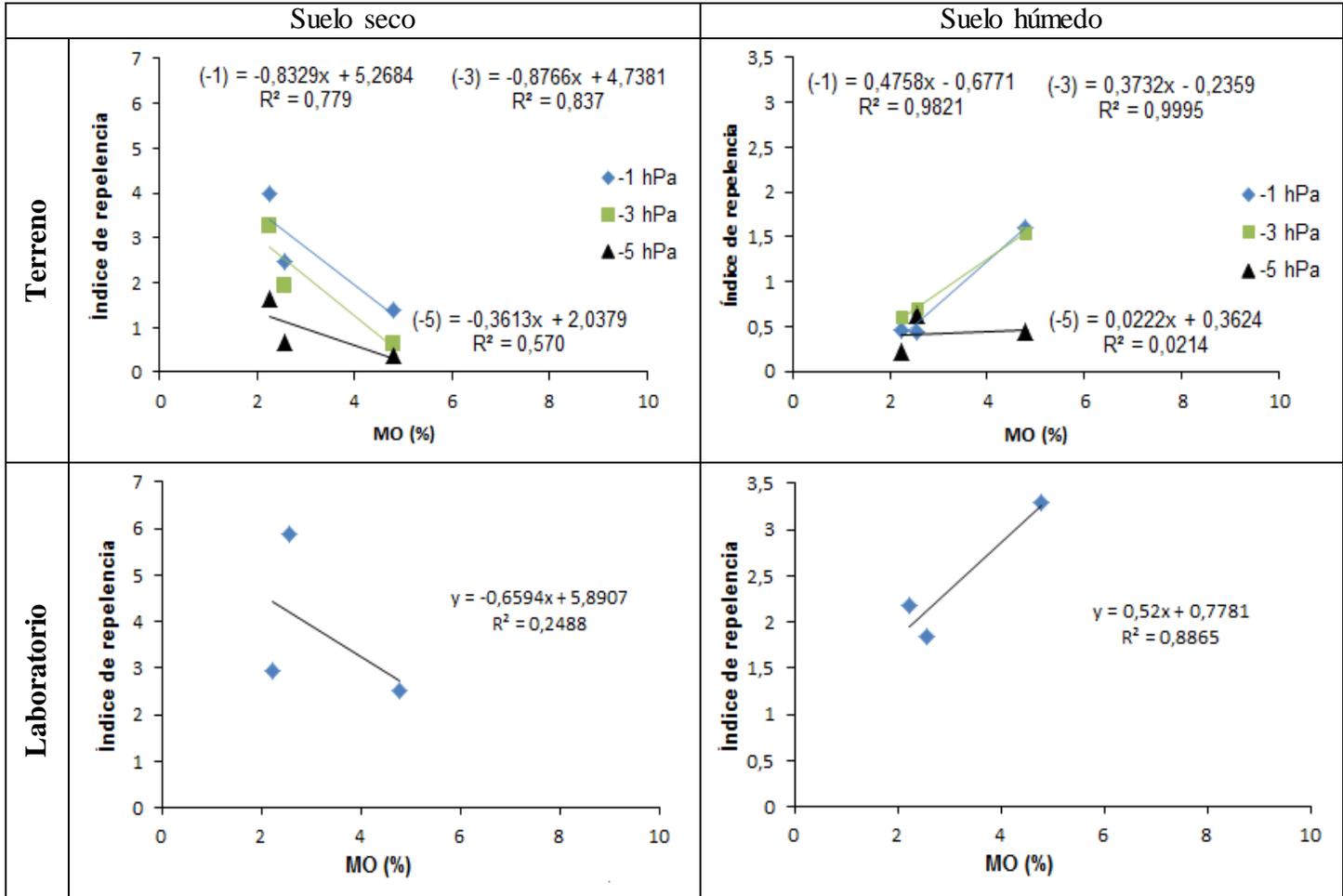
Apéndice 7

Recta de sortividad (promedio) de la Serie MPC



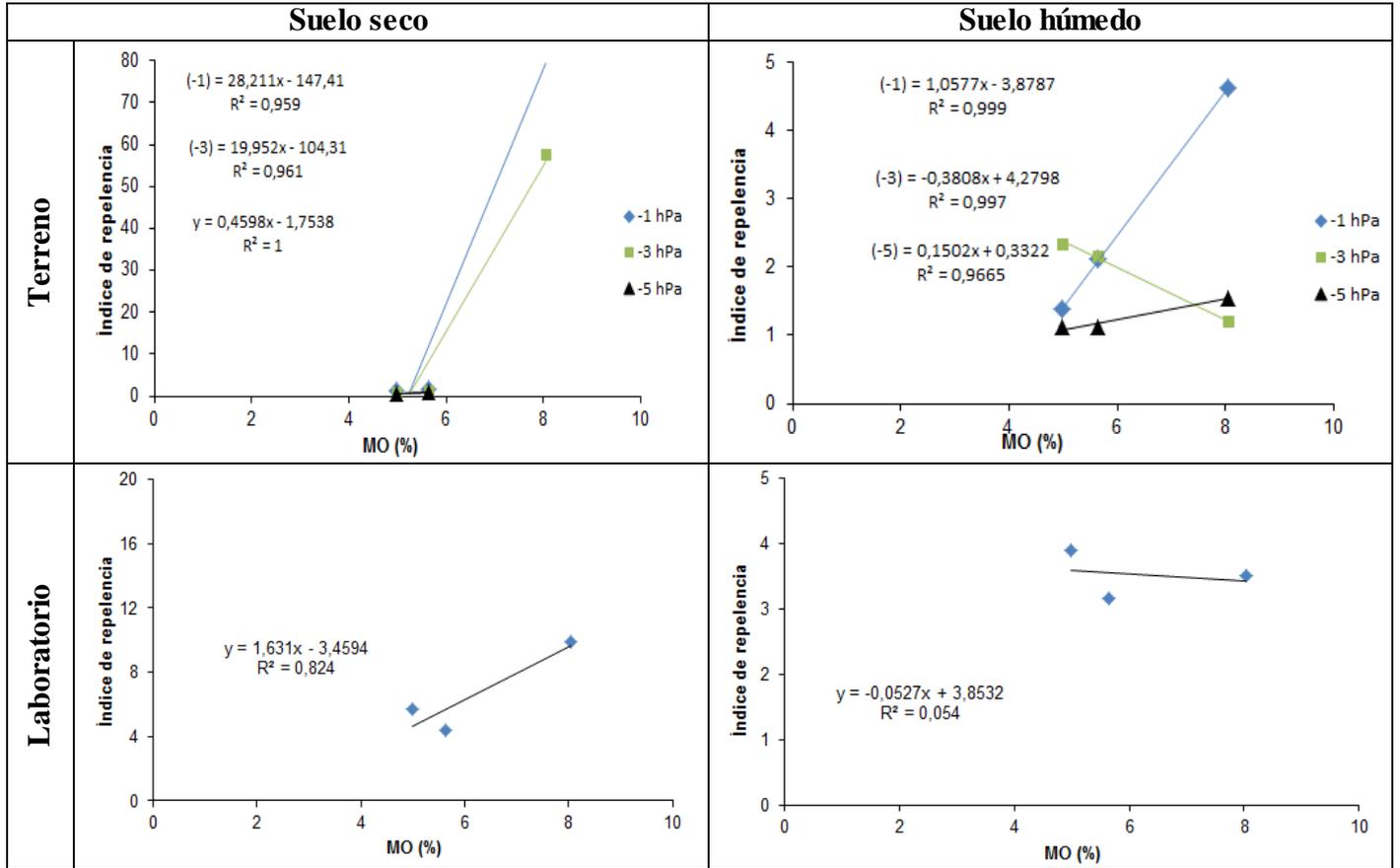
Apéndice 8

Efecto de la materia orgánica en el índice de repelencia (R) en la Serie RLV



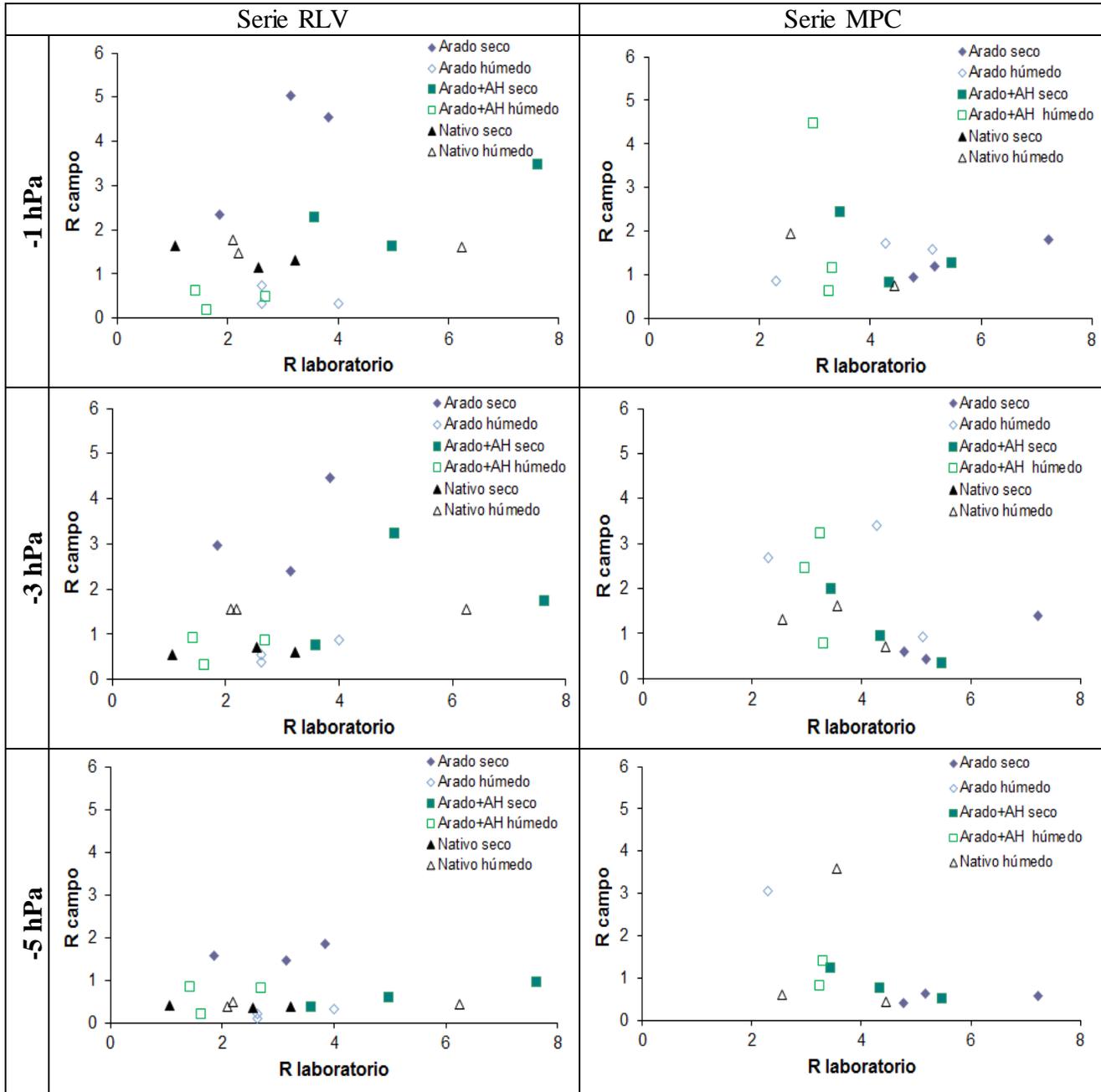
Apéndice 9

Efecto de la materia orgánica en el índice de repelencia (R) en la Serie MPC



Apéndice 10

Correlación entre el índice de repelencia (R) medido en laboratorio y el medido en campo



## ANEXOS

### Anexo I

#### **SERIE RINCONADA LO VIAL, franco arenosa**

#### **Símbolo Cartográfico: RLV**

#### **Caracterización General**

La Serie Rinconada de Lo Vial es un miembro de la Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (Inceptisol).

Suelos aluviales, estratificados, ligeramente profundos, que se presentan en terrazas planas, con o sin microrelieve, del río Mapocho en los alrededores del pueblo de Maipú. El horizonte A es de color pardo grisáceo en el matiz 10YR, presentando vetas de color pardo oscuro en la parte inferior del mismo; textura franco arenosa; estructura de bloques subangulares finos, débiles. Los horizontes B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub> son de color pardo grisáceo oscuro a pardo oscuro en la matiz 10YR; textura areno francosa y una débil estructura de bloques subangulares. El horizonte IIC<sub>1</sub> es de color pardo oscuro a muy oscuro en el matiz 10YR; textura arenosa con trozos de arenas compactadas incluidas dentro de los materiales sueltos. El horizonte IIC<sub>2x</sub> de color gris oscuro y pardo grisáceo oscuro en el matiz 10YR y comprende un fragipán desarrollado sobre textura arenosa o areno francosa, donde no penetran las raíces.

#### **Características Físicas y Morfológicas del Pedón**

#### **Profundidad (cm)**

0-17 A <sub>p</sub>	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; franco arenosa; no plástico y no adhesivo; suelto, friable; estructura de bloques subangulares medios, débiles, que se parten en bloques subangulares finos, débiles. Raíces finas y medias abundantes; poros finos y medios abundantes. Límite lineal, claro.
17-32 B <sub>1</sub>	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; con vetas pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo; franco arenosa; no plástico y no adhesivo; suelto, friable; estructura de bloques subangulares medios, débiles, que se parten en bloques subangulares finos, débiles. Raíces finas comunes; poros finos y medios abundantes. Límite lineal, claro.
32-54 B <sub>2</sub>	Pardo oscuro a pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2.5) en húmedo; areno francosa; no plástico y no adhesivo; suelto, friable; estructura de

- bloques subangulares finos, débiles. Raíces finas escasas, poros finos abundantes. Límite lineal, claro.
- 54-76  
B<sub>3</sub> Pardo oscuro (10YR 4/3) y pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) ambos en húmedo, dispuestos en manchas; arena francosa, no plástico y no adhesivo; suelto, muy friable; estructura de bloques subangulares medios, débiles. Raíces finas aisladas; poros finos abundantes. Límite lineal, abrupto.
- 76-105  
IIC<sub>1</sub> Pardo grisáceo oscuro a muy oscuro (10YR 3/3 a 4/2) en húmedo; arena; no plástico y no adhesivo; suelto, muy friable; grano simple. Raíces no hay; poros finos y medios comunes. Límite lineal, abrupto.
- 105-120  
IIC<sub>2x</sub> Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; fragipán constituido sobre arenas. Raíces no hay.

## Anexo 2

### **SERIE MAPOCHO, franco arcillo limoso**

**Símbolo Cartográfico: MPC**

#### **Caracterización General**

La Serie Mapocho es miembro de la Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol).

Suelos de origen aluvial, profundos, que ocupan la posición de terrazas antiguas del río Mapocho. El horizonte A es de color pardo oscuro en la superficie y pardo grisáceo oscuro en profundidad en el matiz 10YR; la textura franco arcillo limosa o arcillo limosa; bien estructurado, generalmente estructurada de bloques angulares finos y medios, moderados; de muy buen arraigamiento y muy buena porosidad. Los horizontes B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub> son de colores pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR; textura arcillo limosa; estructura de bloques medios que pasan de moderados a fuertes en profundidad; el arraigamiento es bueno y la porosidad abundante.

El horizonte B<sub>3</sub> es de color pardo oscuro en la matiz 5YR; textura franco arcillo limosa o arcillo limosa; estructura de bloques subangulares finos, moderados y de buen arraigamiento.

#### **Características Físicas y Morfológicas del Pedón**

##### **Profundidad (cm)**

0-21 A <sub>11</sub>	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco arcillo limosa a franco arcillosa; ligeramente plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques angulares medios, moderados que se parten en bloques angulares finos, moderados. Raíces finas comunes a abundantes; poros finos abundantes. Límite lineal, gradual.
21-46 A <sub>12</sub>	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, con 10% de pardo rojizo oscuro (8.5YR 4/2) en húmedo; franco arcillosa; ligeramente plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques angulares medios, moderados que se parten en bloques angulares finos, moderados. Raíces finas comunes a abundantes; poros finos abundantes. Límite lineal, gradual.
46-67 B <sub>1</sub>	Pardo rojizo (5YR 3.5/2) en húmedo; franco arcillo limosa; ligeramente plástica y adhesiva, friable a firme; estructura de bloques angulares medios, moderados. Raíces finas comunes, algunas raíces gruesas;

poros finos abundantes. Límite lineal, gradual.

- 67-82  
B<sub>2</sub> Pardo rojizo oscuro (5YR 4/2) en húmedo; franco arcillosa; ligeramente plástico y adhesivo; firme; estructura de bloques angulares medios, fuertes. Raíces finas, medias y gruesas comunes; poros finos abundantes. Nódulos de arcillas de 0.5 cm de diámetro, escasos. Límite lineal, abrupto.
- 82-90  
Extra Pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo; arena francosa muy fina, no plástico y no adhesivo; suelto, grano simple. Raíces medias escasas; poros medios y gruesos comunes. Límite lineal, abrupto.
- 90-130  
B<sub>3</sub> Pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo y pardo rojizo (5YR 4/2) en húmedo; franco arcillo limosa a franca; ligeramente plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques subangulares finos, moderados. Raíces medias escasas hasta 120 cm; poros finos y medios muy abundantes; no hay moteados.