

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

**Memoria de Título**

**CAMBIOS ESTRUCTURALES DE SUELO MEDIANTE EL USO DE  
COBERTURAS VEGETALES Y/O ANÉLIDOS EN UN SITIO CULTIVADO  
CON *Vitis vinifera* EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**

**IGNACIO ANDRÉS ÁLVAREZ GUTIERREZ**

**Santiago, Chile**

**2013**

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

**Memoria de Título**

**CAMBIOS ESTRUCTURALES DE SUELO MEDIANTE EL USO DE  
COBERTURAS VEGETALES Y/O ANÉLIDOS EN UN SITIO CULTIVADO  
CON *Vitis vinifera* EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**

**SOIL STRUCTURAL CHANGES USING COVER CROPS AND/OR ANNELIDS  
IN A SOIL CULTIVATED WITH *Vitis vinifera* IN THE REGION OF  
VALPARAISO, CHILE**

**IGNACIO ANDRÉS ÁLVAREZ GUTIERREZ**

**Santiago, Chile**

**2013**

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

**CAMBIOS ESTRUCTURALES DE SUELO MEDIANTE EL USO DE  
COBERTURAS VEGETALES Y/O ANÉLIDOS EN UN SITIO CULTIVADO CON  
*Vitis vinifera* EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**

Memoria para optar al título profesional de:  
Ingeniero Agrónomo.

**IGNACIO ANDRÉS ÁLVAREZ GUTIERREZ**

	<b>Calificaciones</b>
<b>Profesor Guía</b>	
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,7
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Osvaldo Salazar G. Ingeniero Agrónomo, M.S.Ph.D.	6,5
Sra. Carmen Sáenz H. Químico Farmacéutico, Dr.	6,5

**Santiago, Chile**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis familiares, sobre todo a mi mamá, Victoria, que me ha apoyado siempre en todo.

A mi polola Gabriela.

A mis amigos de la universidad.

A mi profesor guía Oscar Seguel y Don Hugo que fueron muy amables y pacientes.

A Gabriel Sellés.

A la Carmen, Carlos y Adolfo que me ayudaron con el muestreo.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>Palabras clave</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<i>Key words</i> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>Objetivo general</b> .....	5
<b>Objetivos específicos</b> .....	5
<b>MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	6
<b>Materiales</b> .....	6
<b>Metodología</b> .....	6
<b>Análisis estadístico</b> .....	9
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	10
<b>Caracterización del sistema poroso</b> .....	10
Densidad Aparente.....	10
Distribución de tamaño de poros.....	13
<b>Funcionalidad del sistema poroso</b> .....	15
Flujo de aire.....	15
Velocidad de infiltración.....	17
<b>Resistencia mecánica del suelo</b> .....	20
<b>Estabilidad de los agregados</b> .....	22
Estabilidad de microagregados.....	22
Estabilidad de macroagregados.....	23
<b>Productividad de la vid</b> .....	24
<b>CONCLUSIONES</b> .....	26
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	27
<b>APÉNDICES</b> .....	33



## RESUMEN

El presente trabajo evaluó el efecto que produce el uso de coberturas vegetales de la familia Poacea y/o la inoculación de lombrices de la especie *Lumbricus friendi* sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con vid. El ensayo se llevó a cabo en la localidad de San Felipe, en la V Región de Valparaíso, durante los años 2008-2011, en un suelo de la Serie Santa María (Typic Haploxeroll). Los sitios de muestreo fueron parcelas de 25 metros de largo por 6 metros de ancho, abarcando una hilera de plantación de vid con sus dos entre hileras, donde se establecieron los siguientes tratamientos: T0, testigo con suelo desnudo; T1, cultivo de avena; T2, cultivo de centeno; T3, cultivo de avena más aplicación de lombrices; T4, testigo mas aplicación de lombrices. Se realizó el muestreo de suelo sobre y entre hilera y a tres profundidades (0-10; 10-30 y 30-60 cm) con el fin de evaluar propiedades físicas relevantes. El tratamiento con avena y lombrices (T3) tuvo buenos resultados en la funcionalidad del sistema poroso al tener la mayor infiltración acumulada y diferencias significativas en el flujo aire en la sobre hilera; en la estabilidad de macroagregados, incluso, denotó la necesidad de la asociación entre cobertura vegetal y lombriz, al ser el tratamiento más estable entre los 10 y 30 cm de profundidad. La aplicación de lombrices (T4) promovió la menor densidad en la sobrehilera con respecto a la entrehilera y la mayor cantidad de macroporos en superficie; también mostró tener diferencias en la resistencia a la penetración, nuevamente al comparar las ubicaciones entre y sobre hilera; sin embargo, tuvo la menor velocidad de infiltración. Las coberturas vegetales (Avena y Centeno) mostraron efectos positivos en la estructura del suelo, especialmente el Centeno (T2), que presentó la mayor conductividad de agua en la sobrehilera y la menor resistencia mecánica. Sin embargo, los rendimientos de uva disminuyeron en una segunda temporada de evolución en los tratamientos con cobertura vegetal.

**Palabras clave:** *Lumbricus friendi*, cultivo de cobertura, propiedades físicas de suelo, estructura de suelo.

## ABSTRACT

In this study was assessed the effects of cover crops (Poaceae) and/or inoculation of worms (*Lumbricus friendi*) on soil physical properties. The trial was carried out near San Felipe, in the V Region of Valparaiso, during the year 2008-2011. The soil corresponds to Santa María serie, a Typic Haploxeroll, cultivated with vines. The sampling sites were plots of 25 meters long and 6 meter wide, covering a row of vines with two inter-row, which set the following treatments: T0, control with bare soil; T1, oat crop; T2, rye crop; T3, oat crop and worms application; T4, control with worms application. We conducted soil sampling on the row and inter-row at three depths (0-10; 10-30 and 30-60 cm) to evaluate relevant physical properties. Treatment with oat and worms (T3) had good results in the pore functionality, with a higher cumulative infiltration and significant difference in air flow on the row. In macroaggregates stability even denoted the need to association between cover crop and worm, because it showed the highest stability between 10 and 30 cm depth. Application of worms (T4) promoted a lower bulk density on the row with respect to the inter-row and a higher amount of coarse porosity in surface. Also showed differences in the penetration resistance, again by comparing the locations row and inter-row; however, had a low infiltration rate. Vegetative cover (oat and centeno) showed positive effects on soil structure, especially rye (T2) which showed the highest water conductivity in the row planting and the lowest mechanical strength. Nevertheless, the yield of grape decreased in the second season of evaluation in the treatments with cover crops.

**Keywords:** *Lumbricus friendi*, cover crops, soil physical properties, soil structure.



## INTRODUCCIÓN

La producción agrícola lleva implícita la modificación de las propiedades físicas del suelo por labores asociadas a la preparación de la cama de semillas y al posterior tránsito de maquinaria. Un problema frecuente, que ocasiona la degradación en las propiedades físicas, es la compactación, entendiéndose esta como una pérdida de volumen que tiene una masa de suelo por la aplicación de una fuerza externa y que es favorecida por características propias de este (Horn, 1993). Con la pérdida de volumen se produce, al mismo tiempo, un aumento en la densidad aparente, lo que disminuye la cantidad de macroporos y la porosidad total; como consecuencia se dificulta la infiltración de agua, el intercambio gaseoso y aumenta la resistencia mecánica al corte (Ellies *et al.*, 1985). Esto se traduce en un menor crecimiento de la parte radical y aérea, por lo que finalmente es necesario realizar esfuerzos extras, con un mayor impacto económico, para mantener la producción (Eradat Oskoui *et al.*, 1994).

El crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas está supeditado a las condiciones físico-químicas del suelo, especialmente en especies frutales perennes como la vid, pero se ha demostrado que las condiciones físicas son más importantes en el desarrollo de estas, teniendo especial importancia el tamaño y número de poros del suelo, que se relacionan con el intercambio de fluidos como el agua y el aire (Richards, 1983).

Para alcanzar el óptimo productivo, es necesario que las propiedades físicas del suelo permitan expresar el potencial del frutal que se esté produciendo. Para vid esto ocurre cuando la densidad aparente es menor a  $1,3 \text{ Mg m}^3$ , la resistencia a la penetración es inferior a 1500 kPa y la macroporosidad está sobre el 15% (Richards, 1983).

La macroporosidad está directamente relacionada con la productividad; en un estudio realizado por INIA-ODEPA (2000), se mostró que en suelos con 12% de macroporosidad se observaron producciones del orden de 1200 cajas ha<sup>-1</sup> y con macroporosidades del orden de 14,6 % esta aumentó a 1800 cajas ha<sup>-1</sup>.

En las provincias de San Felipe y Los Andes, el 79 % del total de la superficie plantada con uva de mesa (10.487 ha) tiene rangos de densidad aparente sobre los  $1,4 \text{ Mg m}^3$  y el 74% de la superficie cultivada (9.899 ha) tiene valores de macroporosidad bajo el 15%, valor límite para un buen desarrollo radical (Ferreya, 2009).

La aplicación de materia orgánica en grandes cantidades puede mejorar las propiedades físicas del suelo en un corto plazo, disminuyendo la densidad aparente, aumentando la porosidad gruesa y recuperando la estabilidad de agregados (Seguel *et al.*, 2003). Valenzuela (2012), en un ensayo realizado en Vallenar en un suelo franco arcilloso, al utilizar estiércol en las hileras de plantación de vid (*Vitis vinífera*), encontró un incremento de la materia orgánica del suelo, lo que se tradujo en un mejoramiento de las propiedades físicas; sin embargo, fue el tratamiento que conjugó aplicación de estiércol y cultivo de

cobertura el que logró los mejores resultados por un efecto sinérgico entre ambas enmiendas. Por su parte, Poblete (2011) observó una disminución superficial (hasta los 10 cm) en la densidad aparente por el uso de estiércol, pero las coberturas vegetales no lograron modificar esta propiedad en un lapso de tres años.

En el último tiempo se han comenzado a utilizar cubiertas vegetales con distintos objetivos, entre los cuales se encuentra la disminución de la compactación y el mantenimiento o aumento de la porosidad (Baginsky *et al.*, 2010). La utilización de especies como cultivos de cobertura tienen un gran potencial, destacando las gramíneas, las cuales poseen sistemas radiculares uniformes, concentrándose entre los primeros 20 -30 cm, con un alto potencial estructurador dada la intensidad de secado y los exudados de las raíces (Premadal y Deen, 2006).

Se han visto diferencias en la efectividad y en los resultados al utilizar coberturas vegetales en vides, dependiendo principalmente de la clase textural del suelo en que se cultivan. Así, Poblete (2011), que utilizó coberturas (Gramíneas, Brasicáceas y Fabáceas) en un suelo con clase textural fina, observó, como resultado, la generación de porosidad gruesa con continuidad en todo el perfil, mientras que Sandoval (2010), trabajando en un suelo pedregoso de matriz gruesa con rotaciones de diferentes especies (Poáceas y Fabáceas), encontró que solo las rotaciones que incluían fabáceas fueron capaces de modificar el sistema poroso, generando una continuidad en profundidad, esto debido a su sistema radicular pivotante.

Las lombrices cumplen un rol importante ayudando a disminuir la compactación, esto es posible porque facilitan la penetración de las raíces, ya que al construir galerías humedecen el suelo con sus secreciones salivares, luego lo ingieren y al pasar por el intestino se mezcla la materia orgánica e inorgánica. Estas galerías pueden aumentar su diámetro si una segunda lombriz, de mayor diámetro, inserta la parte anterior de su cuerpo, ejerciendo una presión radial (Lee y Foster, 1991). Así la importancia principal de las galerías en el suelo desde el punto de vista físico, consiste en el aumento de la macroporosidad, mejorando la infiltración de agua y la aireación del suelo (Blanchart, 1992).

La inoculación con lombrices ha demostrado mejorar las propiedades físicas del suelo, disminuyendo la densidad aparente y aumentando la macroporosidad y la velocidad de infiltración (Fuentes, 2007). Para asegurar su sobrevivencia y que aumenten su biomasa, las lombrices requieren del aporte de sustrato vegetal en forma permanente, por lo que su uso en asociación con cultivos de cobertura promoverá una población estable (Sellés *et al.*, 2005) y, en consecuencia, debiese tener un mayor impacto sobre las propiedades físicas del suelo en relación a las mismas estrategias por separado.

### **Objetivo general**

Determinar el efecto de las coberturas vegetales y/o lombrices sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con vid en la V Región de Valparaíso.

### **Objetivos específicos**

- Comparar el aporte de cultivos (avena y centeno) al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.
- Determinar el aporte de las lombrices actuando solas o asociadas a un cultivo al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.
- Establecer relaciones entre propiedades físicas y el rendimiento de un parronal de uva de mesa al cabo de tres años de manejo con cultivos.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Materiales

El presente estudio evaluó los efectos acumulados de un proyecto en que durante tres años (2008-2010) se realizaron manejos con cultivos de cobertura y lombrices. El ensayo se estableció en el predio El Álamo (32°46'14,28" S y 70°38'05,40" O), ubicado a 11 km al este de la Ciudad de San Felipe. Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

El estudio se llevó a cabo el año 2010 en un suelo cultivado con vides de uva de mesa cv. Flame Seedless, conducidas en parrón español a 3,5m x 3,0m y plantadas el año 2004 sobre patrón franco. Se utilizó riego por microaspersión, con un emisor por planta, empleando microaspersores de marca Dan del tipo modular invertido con boquilla café y antimist, ubicados a 80 cm sobre el suelo y con diámetro de mojamiento de 4,2 m.

Según Santibáñez *et al.* (1990), el clima de la zona es de tipo Mediterráneo semiárido. Las temperaturas máximas del mes más cálido superan los 32°C, con acumulación térmica primavera – verano de 1.400 a 1.500 días – grado (base 10°C). La precipitación media anual alcanza a 250 mm, concentrándose entre Mayo y Agosto, además hay un periodo seco de 8 meses, libre de heladas. La evapotranspiración potencial es de 1.272 mm al año, siendo enero el mes de máxima demanda, con 190 mm. El invierno posee un alto poder vernalizador, asegurando el cumplimiento de los requerimientos de frío.

El suelo corresponde a la Serie Santa María, el cual es miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Typic Haploxerolls. Es un suelo sedimentario, profundo, de origen aluvial, que descansa sobre un substrato de grava redondeada de composición petrográfica mixta, con matriz franco arcillo arenosa que permite el desarrollo de raíces en profundidad. La Fase que mejor representa el suelo del sector es la SM-1, que ocupa una posición de terraza aluvial remanente, de topografía plana a plana inclinada, con pendientes de 1 a 3 % (CIREN, 1997).

### Metodología

Las unidades experimentales estuvieron constituidas por parcelas de 25 metros de largo por 6 metros de ancho, abarcando una hilera de plantación con sus dos entre hileras, las cuales estaban distribuidas al azar. Los tratamientos, cada uno con tres repeticiones, consistieron en un testigo y parcelas con siembra de cultivos en la entre hilera, más la aplicación de lombrices, correspondiendo a:

- T0: Testigo
- T1: Avena
- T2: Centeno
- T3: Avena + lombrices
- T4: Testigo + lombrices

Las especies utilizadas para este ensayo fueron avena (*Avena sativa*) cv. Nehuén, cubierta comúnmente utilizada por agricultores del valle; centeno (*Secale cereale*) cv Forrajero Platina, esta última seleccionada por su rusticidad y por poseer ácidos hidroxámicos, alelopático (inhibitorio) de malezas.

La preparación del suelo consistió en pasar tres veces el arado de disco por cada entrehilera. La siembra se hizo manualmente (al voleo), se utilizó un sembrador con experiencia para esparcir uniformemente la semilla. La dosis de siembra para centeno y avena fue de 200 kg ha<sup>-1</sup>. La siembra se realizó a comienzos de invierno de cada año, manteniendo un monocultivo durante los tres años del ensayo. Se realizaron siegas dos veces por temporada en el periodo 2008-2010, con una segadora acoplada al tractor; luego de la segunda siega (mes de septiembre) se aplicó glifosato para evitar la competencia de las cubiertas vegetales con la vid. Después de cada siega se formó un mulch vegetal que se fue acumulando manualmente con un rastrillo en las sobrehileras. No se aplicó más fertilización que la que se aplica periódicamente para el mantenimiento de la vid. Para el caso de T3 y T4, en parcelas extras se realizaron aplicaciones de lombrices de tierra. El 1° de octubre de 2008 se sembraron lombrices de la especie *Lumbricus friendi* en 10 plantas del tratamiento testigo y de la avena ubicadas en hileras contiguas. En total se sembraron 84 lombrices por planta repartidas en tres hoyos de 20cm de profundidad construidos en la sobre hilera.

Para la evaluación del efecto de los manejos de cada tratamiento sobre las propiedades físicas del suelo, en marzo de 2011 se tomaron muestras de suelo por horizonte pedogenético (0-10; 10-30 y 30-50 cm aproximadamente) tanto en la entre como en la sobre hilera y se midieron las siguientes propiedades físicas:

- Densidad aparente por el método del cilindro y del terrón (Grossman y Reinsch, 2002).
- Distribución de tamaño de poros y curva característica mediante cama de arena y olla y plato de presión (Dane y Hopmans, 2002). Para esto se utilizaron cilindros de 5cm de altura y 5,9cm de diámetro, obtenidos de muestras sin disturbar. Los cilindros se sometieron a una tensión de 0,2; 3; 6; 30 y 100 kPa en una cama de arena y un plato de presión hasta alcanzar el equilibrio mátrico. Para determinar el contenido de agua en el punto de marchitez permanente (1500 kPa) se utilizaron las muestras de suelo disturbadas en una olla de presión (Dane y Hopmans, 2002), convirtiendo el contenido de agua en base al peso (Pw) a contenido volumétrico de agua (Pv) por  $Pv = Pw \cdot Da$ ,

donde  $D_a$  es la densidad aparente determinada mediante el método del cilindro. Según Hartge y Horn (2009), con los datos de la curva de retención de agua, los poros de drenaje rápido (PDR,  $>50 \mu\text{m}$ ) se calcularon como la diferencia entre la porosidad total y la porosidad en equilibrio a  $-6 \text{ kPa}$ ; los poros de drenaje lento (PDL,  $10\text{-}50\mu\text{m}$ ) se calcularon como la diferencia entre el contenido de agua a  $-6$  y  $-33 \text{ kPa}$ , y el agua o humedad aprovechable (HA,  $0,2\text{-}10\mu\text{m}$ ) se calculó como la diferencia entre la retención de agua a  $-33$  y  $-1500 \text{ kPa}$ .

– Flujo de aire mediante conductivímetro de convección (Peth, 2004). Para esto, con muestras equilibradas a  $-33 \text{ kPa}$  en olla de presión, se midió el flujo de aire según la metodología detallada por Farías (2009).

– Estabilidad de macro agregados por tamizaje en seco y húmedo (Hartge y Horn, 2009) y de micro agregados mediante la relación de dispersión (Seguel *et al.*, 2003). El tamizaje en seco y húmedo consideró agregados menores a  $3 \text{ cm}$ , con ciclos de  $2$  minutos a  $50 \text{ Hertz}$ , para el caso de la condición en seco, y  $5$  minutos a  $60 \text{ rpm}$ , para el tamizado en húmedo. Con las curvas de acumulación de tamaño de agregados tamizados en seco y húmedo se determinó la variación de diámetro medio ponderado (VDMP), en cuyo caso el menor valor denota mayor estabilidad. Para la relación de dispersión (RD) se utilizaron microagregados de entre  $1$  y  $2 \text{ mm}$ , realizando una dispersión suave en agua destilada, mientras que en una contramuestra se realizó una dispersión fuerte, agregando polifosfato de sodio y agitación mecánica. La RD se calculó como la razón entre la arcilla y limo de la dispersión suave respecto a la arcilla y limo de la dispersión fuerte, de acuerdo al método del hidrómetro de Bouyoucos, en cuyo caso el menor RD denota la mayor estabilidad.

En campo se midió también la velocidad de infiltración y la resistencia a la penetración. La velocidad de infiltración se midió mediante cilindro infiltrómetro (Reynold *et al.*, 2002), ubicando el cilindro en la sobre y la entre hilera y realizando mediciones hasta el momento de estabilización del flujo de agua ( $240$  minutos aproximadamente). La resistencia mecánica se evaluó con el suelo a capacidad de campo ( $24$  horas después de un riego), mediante penetrometro de punta cónica de  $60^\circ$  (Koolen y Kuipers, 1983) con un penetrológico marca Eijkelkamp, tomando tres repeticiones por ubicación (entre y sobre hilera) y unidad experimental cada  $10 \text{ cm}$  hasta aproximadamente los  $50 \text{ cm}$  de profundidad, donde aparece el sustrato pedregoso característico de la Serie Santa María.

Para T3 y T4 solo se consideró como efecto tratamiento el producido por las lombrices en la sobrehilera, por lo que para la comparación de propiedades no se incluyeron los resultados de la entrehilera. Aún así se tomaron muestras de suelo en una de las repeticiones con el fin de tener un valor comparativo entre ubicaciones en algunas de las propiedades evaluadas.

En forma complementaria, para los tratamientos T0, T1 y T2, se dispuso del rendimiento comercial de uva ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), durante las temporadas 2009-2010 y 2010-2011, con lo que se buscaron posibles relaciones entre propiedades físicas de suelo y parámetros de producción.

### **Análisis estadístico**

El diseño experimental fue de parcelas al azar con tres repeticiones. Los resultados obtenidos se analizaron mediante ANDEVA con un nivel de confianza de 95%, comparando los tratamientos a una misma profundidad y ubicación (entre y sobrehilera). Cuando se desarrolló la prueba y se encontraron diferencias significativas, se utilizó un test de rango múltiple (LSD,  $\alpha < 0,05$ ). También se realizaron comparaciones, dentro de un mismo tratamiento y profundidad, entre la posición entre y sobrehilera, realizando una prueba t con un nivel de confianza de 95%. Además se realizó una prueba t en la prueba de infiltración, en la que se compararon las pendientes de la recta de infiltración estabilizada tomando tratamientos de a pares en comparación todos con todos dentro de una misma posición (entrehilera o sobrehilera).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del sistema poroso

#### Densidad Aparente

El Cuadro 1 presenta los valores de densidad aparente ( $D_a$ ), determinados por el método del cilindro, en función de la profundidad de suelo. No se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

**Cuadro 1.** Densidad aparente por el método del cilindro ( $\text{Mg m}^{-3}$ , promedio  $\pm$ DS) de los distintos tratamientos según ubicación de la muestras (sobre hilera y entre hilera) y profundidad de muestreo.

Tratamiento	Densidad aparente cilindro ( $\text{Mg m}^{-3}$ )		
	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
	Sobre hilera		
<b>T0</b>	1,22 ( $\pm 0,044$ )	1,36 ( $\pm 0,054$ ) *	1,40 ( $\pm 0,191$ )
<b>T1</b>	1,01 ( $\pm 0,249$ )	1,37 ( $\pm 0,154$ )	1,41 ( $\pm 0,256$ )
<b>T2</b>	1,35 ( $\pm 0,201$ )	1,40 ( $\pm 0,034$ )	1,48 ( $\pm 0,125$ )
<b>T3</b>	1,07 ( $\pm 0,107$ )	1,36 ( $\pm 0,126$ )	1,52 ( $\pm 0,121$ )
<b>T4</b>	1,12 ( $\pm 0,010$ )	1,34 ( $\pm 0,153$ )	1,43 ( $\pm 0,139$ )
	Entre hilera		
<b>T0</b>	1,26 ( $\pm 0,025$ )	1,58 ( $\pm 0,023$ )	1,48 ( $\pm 0,145$ )
<b>T1</b>	1,37 ( $\pm 0,144$ )	1,32 ( $\pm 0,063$ )	1,47 ( $\pm 0,079$ )
<b>T2</b>	1,44 ( $\pm 0,055$ )	1,47 ( $\pm 0,164$ )	1,43 ( $\pm 0,096$ )

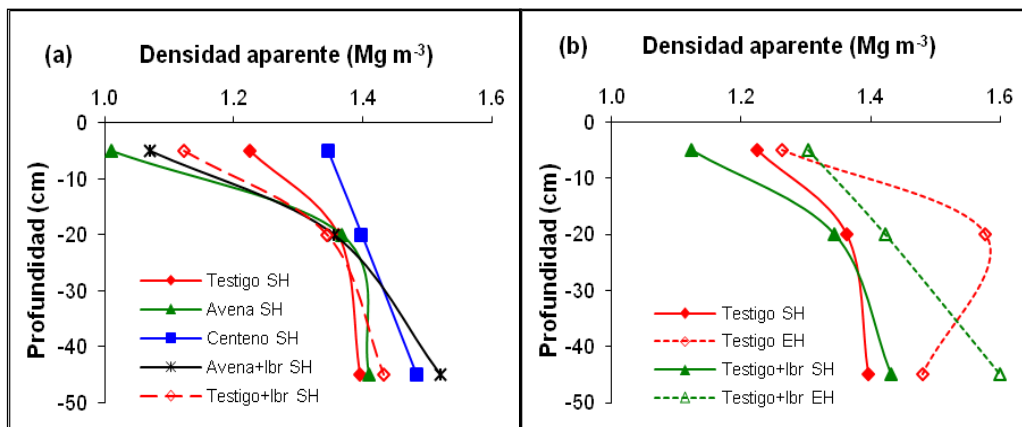
El asterisco (\*) denota diferencias entre ubicaciones para un mismo tratamiento ( $p < 0,05$ ). T0: Testigo; T1: Avena; T2: Centeno; T3: Avena + lombrices; T4: Testigo + lombrices.

La densidad aparente es un índice que cambia mucho dentro de la temporada debido a la intervención producto del laboreo (Brady y Weil, 2000). Si bien la  $D_a$  no es una propiedad plenamente confiable para evaluar el efecto del manejo sobre las propiedades del suelo, es lo suficientemente sensible para reflejar la variabilidad en el corto plazo. Existe la tendencia a disminuir la  $D_a$  en el horizonte superficial de la sobre hilera cuando se utiliza avena como cultivo de cobertura o bien está en asociación con lombrices (T1 y T3). Esto queda demostrado en forma gráfica en la Figura 1a, donde por sí sola la acción de las lombrices genera un impacto positivo sobre el suelo, al generar macroporos que se traducen en una menor  $D_a$ ; sin embargo, el efecto se concentra superficialmente, más aún



considerando que el sistema radical de las gramíneas bajo riego no profundiza en el perfil (Lipiec y Nosalewicz, 2004).

Prácticamente todos los tratamientos presentaron una mayor Da en la entrehilera (EH), como resultado del paso directo de maquinaria; para el caso del testigo, se generó una diferencia significativa respecto a la condición sobrehilera (SH) entre los 10-30 cm de profundidad (Cuadro 1). La ausencia de diferencias entre posición (EH versus SH) en el resto de los tratamientos podría estar indicando una mejora en las condiciones de suelo a causa del desarrollo radical de las coberturas, especialmente entre los 10 y 30 cm de profundidad. Todos los tratamientos presentaron una tendencia a aumentar la Da en profundidad (Figura 1a) como resultado de la masa sobreyacente (Rücknagel *et al.*, 2012); sólo la entre hilera del testigo acusó una sobre densificación entre 10 y 30 cm (Figura 1b), lo que podría estar indicando la presencia de un pie de arado, característico de sistemas agrícolas intensivos (Hamza y Anderson, 2005).



**Figura 1.** (a) Distribución en profundidad de la densidad aparente para la sobre hilera (SH) de los distintos tratamientos. (b) Estado de compactación del testigo evaluado en la entre hilera (EH) y contraste con su situación sobrehilera (SH) y con lombriz.

Los valores de Da resultaron, en general, más bajos que los obtenidos por Poblete (2011) para un suelo franco arcilloso en Copiapó, el cual presentaba un nivel de compactación inicial mayor; en el presente estudio, los tratamientos con avena (T1 y T3) incluso presentaron una densidad aparente en superficie similar a la obtenida por la misma autora en un tratamiento con estiércol de cabra (1,02 Mg m<sup>-3</sup>).

Los valores de densidad aparente, obtenidos por el método del terrón, son mayores comparados a los obtenidos por el método del cilindro porque, a diferencia del cilindro, que confina un volumen de suelo que contiene los agregados y el espacio entre ellos, la densidad obtenida por el método del terrón no considera el espacio entre los agregados (Sandoval *et al.*, 2012). El Cuadro 2 presenta los resultados comparativos entre tratamientos para una misma ubicación (sobre y entre hilera).

**Cuadro 2.** Densidad aparente por el método del terrón ( $\text{Mg m}^{-3}$ , promedio  $\pm$  DS) para diferentes tratamientos según ubicación y profundidad de muestreo.

Tratamiento	Densidad aparente terrón ( $\text{Mg m}^{-3}$ )		
	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
	Sobre hilera		
<b>T0</b>	1,66( $\pm$ 0,11)	1,70( $\pm$ 0,09)	1,62( $\pm$ 0,15)
<b>T1</b>	1,64( $\pm$ 0,11)	1,54( $\pm$ 0,14)	1,69( $\pm$ 0,16)
<b>T2</b>	1,65( $\pm$ 0,13)	1,80( $\pm$ 0,19)	1,58( $\pm$ 0,15)
<b>T3</b>	1,54( $\pm$ 0,16)	1,68( $\pm$ 0,08)	1,60( $\pm$ 0,12)
<b>T4</b>	1,63( $\pm$ 0,10)	1,63( $\pm$ 0,15)	1,66( $\pm$ 0,50)
	Entre hilera		
<b>T0</b>	1,70( $\pm$ 0,05)	1,83( $\pm$ 0,08)	1,65( $\pm$ 0,09)
<b>T1</b>	1,62( $\pm$ 0,13)	1,78( $\pm$ 0,13)	1,62( $\pm$ 0,04)
<b>T2</b>	1,71( $\pm$ 0,14)	1,74( $\pm$ 0,16)	1,69( $\pm$ 0,10)

No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Al comparar la densidad aparente entre los distintos tratamientos a una misma profundidad, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ninguno de ellos. Por debajo de los 30 cm todos los tratamientos tienden a ser similares entre sí y con valores altos, lo que implica una disminución en la porosidad, lo que se traduce en una menor capacidad de conducir agua y aire (Warrick, 2002). Esto es importante para las lombrices que necesitan humedad, temperatura y contenidos de materia orgánica para su desarrollo (Bouché, 1984). Se mantuvo la tendencia general, al comparar la sobre hilera con la entre hilera tomando cada tratamiento por separado, a un aumento de densidad en esta última ubicación. Esto se expresó en el tratamiento 4 (Testigo con aplicación de lombrices), para el cual se tomaron agregados en la entrehilera, donde se encontraron diferencias entre ambas ubicaciones del horizonte superficial (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Densidad aparente por el método del terrón ( $\text{Mg m}^{-3}$ ). Comparación entre ubicaciones (sobre y entrehilera) para el tratamiento 4 (Testigo con aplicación de lombrices).

Ubicación	Da Terrón ( $\text{Mg m}^{-3}$ )		
	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
SH	1,64 ( $\pm$ 0,04) b	1,64( $\pm$ 0,26) a	1,67( $\pm$ 0,02) a
EH	1,84( $\pm$ 0,05) a	1,78( $\pm$ 0,11) a	1,87( $\pm$ 0,14) a

Letras distintas corresponden a diferencias significativas a una misma profundidad de muestreo ( $p < 0,05$ ).

La diferencia de densidad aparente se debe al paso de maquinaria en la entre hilera. La aplicación constante de una fuerza mayor a la capacidad de soporte del suelo disminuye el espacio poroso, aumentando la densidad (Horn, 2003). La disminución del espacio poroso provoca de inmediato una disminución en el intercambio gaseoso, lo que dificulta que las raíces y los anélidos crezcan y puedan generar los cambios en la estructura del suelo favorables para el desarrollo de la vid (Horn y Smucker, 2005; Hamza y Anderson, 2005). El tratamiento con lombrices manifestó un efecto parcial sólo en la sobre hilera, que al no estar expuesta a la carga del laboreo permite que los agregados en esa ubicación tengan una densidad menor. Sin embargo, se dificulta la colonización de la entre hilera por parte de las lombrices si es que estas no tienen un sustrato como alimento.

Otra explicación del por qué la densidad solo cambia hasta los 10 cm de profundidad puede ser la existencia, como ya se mencionó, de un pie de arado y los distintos tratamientos no tuvieron el tiempo de remediarlo (Cuadro 2). Esto puede limitar el intercambio de fluidos y con él los contenidos de materia orgánica y todas las condiciones que permiten una mayor estructuración. Sawchik *et al.* (2012), determinaron en un ensayo de largo plazo (10 años) con cultivos de cobertura de gramíneas, que estas no lograron cambiar la densidad aparente con respecto a un control sin cobertura, pero sin embargo fueron capaces de generar una mayor porosidad gruesa.

El tránsito de maquinaria también puede generar un efecto de amasado del suelo por patinaje, el que al secarse forma grietas de corte por la contracción de las arcillas (Pathak *et al.*, 2011). Esto se traduce en que en el conjunto suelo no se observan diferencias tan marcadas entre la densidad aparente de la SH y la EH, medida a través del cilindro (Cuadro 1), pero sí se generan agregados más densos (Cuadro 2) por efecto del secado del suelo.

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

Según la clasificación de Ellies *et al.* (1995) y en base a la curva característica de retención de agua, se compararon los tratamientos a una misma profundidad. Los resultados se presentan en el Cuadro 4, donde a nivel de poros de agua útil se generaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Los poros de drenaje lento (PDL) no presentaron diferencias, variando entre 3 y 7 %, por lo que no fueron incluidos en el Cuadro 4. Los poros de drenaje rápido ( $>50 \mu\text{m}$ ), determinados entre equilibrios mátricos de  $-0,2$  y  $-6\text{kPa}$ , aumentaron en la superficie (0-10 cm) de la sobre hilera en todos los tratamientos con respecto a la entre hilera; a nivel de tratamientos, destaca la actividad de lombrices (T3 y T4) que por sí sola tuvo un efecto positivo. Este efecto se concentró en superficie, y para el caso del testigo con lombrices (T4) se tradujo en una menor disponibilidad de poros de agua aprovechable ( $0,2 - 10 \mu\text{m}$ ), ya que la lombriz, al construir un sistema de poros, compacta las paredes a tamaños de retención no disponibles para las plantas, mientras que el poro remanente, de dominancia vertical y alta continuidad, favorece el drenaje del suelo (Taylor y Brar, 1991).

**Cuadro 4.** Distribución de tamaño de poros (% , promedio  $\pm$ DS) de los distintos tratamientos según ubicación de las muestras (sobrehilera y entrehilera) y profundidad de muestreo. La entrehilera de T3 y T4 fue muestreada en una unidad experimental.

Tamaño poro ( $\mu\text{m}$ )	Tratamiento	Profundidad (cm)		
		0-10	10-30	30-60
Sobre hilera				
<b>PDR</b> ( $>50 \mu\text{m}$ )	<b>T0</b>	14,3 ( $\pm 4,3$ )	16,3 ( $\pm 2,3$ ) *	14,9 ( $\pm 4,7$ )
	<b>T1</b>	18,3 ( $\pm 9,4$ )	12,2 ( $\pm 2,3$ )	13,4 ( $\pm 7,6$ )
	<b>T2</b>	10,9 ( $\pm 5,4$ )	12,8 ( $\pm 4,6$ )	10,8 ( $\pm 1,1$ )
	<b>T3</b>	19,9 ( $\pm 2,0$ )	12,2 ( $\pm 2,3$ )	11,0 ( $\pm 5,7$ )
	<b>T4</b>	20,3 ( $\pm 1,3$ )	13,1 ( $\pm 6,0$ )	14,6 ( $\pm 2,1$ )
<b>PAU</b> ( $10 - 0,2 \mu\text{m}$ )	<b>T0</b>	15,1 ( $\pm 3,0$ )	16,0 ( $\pm 2,5$ ) b	12,1 ( $\pm 2,0$ )
	<b>T1</b>	10,2 ( $\pm 1,7$ ) *	16,0 ( $\pm 2,4$ ) b	11,3 ( $\pm 4,3$ )
	<b>T2</b>	23,0 ( $\pm 9,4$ )	12,8 ( $\pm 1,9$ ) ab	13,8 ( $\pm 3,2$ )
	<b>T3</b>	9,8 ( $\pm 3,7$ )	10,0 ( $\pm 1,5$ ) a	13,9 ( $\pm 6,3$ )
	<b>T4</b>	5,0 ( $\pm 2,9$ )	10,4 ( $\pm 1,2$ ) a	7,3 ( $\pm 2,3$ )
Entre hilera				
<b>PDR</b> ( $>50 \mu\text{m}$ )	<b>T0</b>	13,4 ( $\pm 5,8$ )	9,1 ( $\pm 0,4$ )	11,1 ( $\pm 2,5$ )
	<b>T1</b>	11,6 ( $\pm 3,0$ )	13,2 ( $\pm 2,6$ )	15,9 ( $\pm 1,1$ )
	<b>T2</b>	8,4 ( $\pm 5,2$ )	10,8 ( $\pm 4,4$ )	8,1 ( $\pm 4,5$ )
	<b>T3</b>	11,6	7,1	9,2
	<b>T4</b>	16,8	17,0	10,7
<b>PAU</b> ( $10 - 0,2 \mu\text{m}$ )	<b>T0</b>	13,3 ( $\pm 3,5$ )	9,5 ( $\pm 5,3$ )	10,9 ( $\pm 6,4$ )
	<b>T1</b>	17,6 ( $\pm 3,8$ )	15,0 ( $\pm 3,8$ )	9,9 ( $\pm 1,7$ )
	<b>T2</b>	20,1 ( $\pm 1,9$ )	12,8 ( $\pm 1,5$ )	11,7 ( $\pm 5,6$ )
	<b>T3</b>	13,2	13,5	9,7
	<b>T4</b>	14,1	18,8	13,5

PDR: Poros de drenaje rápido; PAU: Poros de agua útil. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos para una misma profundidad, tipo de poro y ubicación de la muestra. El asterisco (\*) denota diferencias entre ubicaciones para un mismo tratamiento ( $p < 0,05$ ).

El tratamiento de centeno (T2) tuvo un comportamiento distinto en superficie (0-10 cm), con bajos niveles de poros gruesos, los que pudieron sufrir un colapso por el pisoteo de la sobre hilera durante los manejos de la vid o bien por relleno de poros gruesos por parte de

la materia orgánica al descomponerse, una vez que se siega el cultivo (Horn y Smucker, 2005; Seguel y Horn, 2006). Aún así la disminución de la porosidad gruesa resultó en la mayor presencia de poros de agua útil entre 0-10cm, aunque la alta variabilidad de los resultados impidió generar diferencias con significancia estadística. Donde sí se presentaron diferencias significativas fue en los poros de 0,2 a 10  $\mu\text{m}$  entre los 10-30 cm, profundidad en la que los tratamientos con lombrices (T3 y T4) presentaron una menor porosidad de agua aprovechable en relación al testigo (T0) y avena (T1).

En la entre hilera los resultados no marcaron una tendencia clara, aunque la avena (T1) mantuvo una mayor continuidad entre los horizontes, presentando un aumento gradual de los poros de drenaje rápido en profundidad, con una disminución igualmente gradual del agua aprovechable; el centeno (T2), por su parte, concentró sus efectos en superficie (0-10 cm), con un posible relleno de poros por parte de las raíces en descomposición, los cuales pasaron a constituir poros de retención de agua.

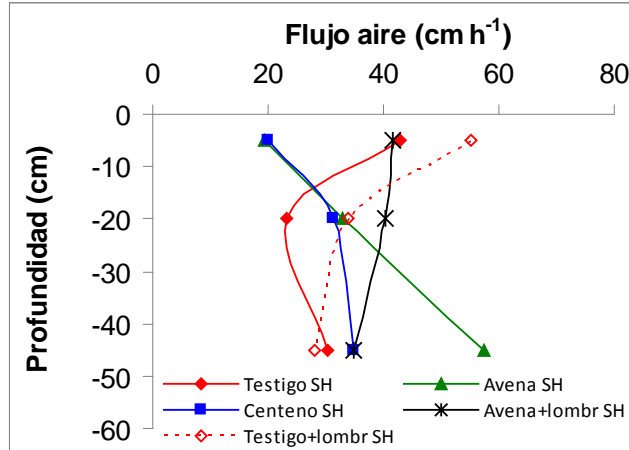
Como se indicó anteriormente, sólo los poros de agua útil de la sobrehilera entre 10-30 cm, presentaron diferencias estadísticamente significativas, en que los tratamientos T0 y T1 fueron mayores a T3 y T4; sin embargo, la actividad de lombrices no se materializó en un mayor volumen de poros gruesos (PDR,  $>50 \mu\text{m}$ ) ni de mesoporos (10-50  $\mu\text{m}$ , datos no mostrados). Es posible que el corto plazo (3 años) de aplicación de los tratamientos aún no sea suficiente para lograr efectos positivos; por otra parte, al momento del muestreo se encontraron evidencias de la actividad de lombrices con poros de un tamaño mayor a 500  $\mu\text{m}$ , por lo que la determinación de los PDR pudo tener un error experimental al no considerar este tipo de poros a la tensión de equilibrio de 0,2 kPa (Hartge and Horn, 2009).

La avena (T1) generó resultados estadísticamente significativos al comparar la sobrehilera con la entrehilera, presentándose una mayor proporción de poros de agua aprovechable en superficie (0-10 cm) en la entrehilera de plantación. Debido a que la porosidad total se mantiene similar entre ubicaciones, la mayor proporción de poros de retención de agua en la entrehilera se genera a costa de una menor proporción de poros gruesos, donde el macroporo generado por la raíz en crecimiento queda relleno por la raíz en descomposición, al final de la temporada, aumentando su capacidad de retener agua (Oades, 1993). A su vez, los PDR del testigo en la entrehilera fueron menores a los de sobrehilera, entre 10-30 cm de profundidad, acorde con los resultados de densidad aparente (Cuadro 1), producto de la compactación generada por el paso de maquinaria.

## **Funcionalidad del sistema poroso**

### **Flujo de aire**

En cuanto a la funcionalidad del sistema poroso grueso, las Figuras 2 y 3 presentan los resultados del flujo de aire medidos en un conductivímetro de convección con muestras inalteradas y equilibradas a capacidad de campo (-33kPa).

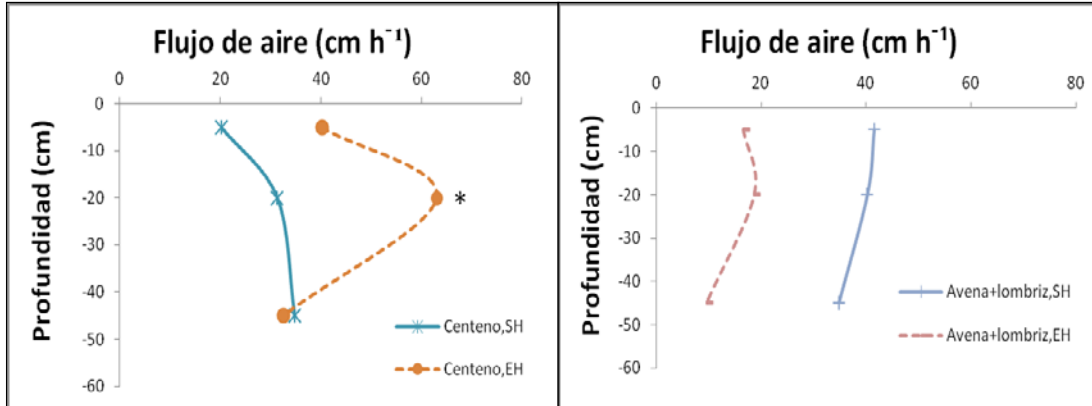


**Figura 2.** Flujo de aire ( $\text{cm h}^{-1}$ ) en función de la profundidad para las muestras colectadas en la sobrehilera (SH). No hubo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Para el promedio de todo el perfil, el testigo presentó la menor permeabilidad al aire, con una marcada discontinuidad a los 20 cm de profundidad; el uso de lombrices de tierra generó un incremento homogéneo de la capacidad de conducir aire, al menos dentro de los primeros 40 cm. En la sobrehilera, la descomposición de los cultivos no generó el efecto benéfico esperado, especialmente en superficie, debido posiblemente a un efecto tortuoso generado por los residuos (Dörner *et al.*, 2009); sin embargo, la acción conjunta del rastrojo de avena con lombriz promovió una porosidad gruesa continua, con una capacidad de flujo homogénea en profundidad. La alta variabilidad de la conductividad de aire impidió obtener diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Los valores de flujo de aire son ligeramente bajos comparados con los que obtuvo Seguel *et al.* (2011) en un suelo de clase textural gruesa (Typic Haplocambid) donde las tasas de flujo de aire para un tratamiento que estaba compuesto por una rotación de cultivos anuales (haba, cebada y arveja) alcanzaron valores de  $60 \text{ cm h}^{-1}$  en muestras de 10-30 cm de profundidad. Poblete (2011), por otro lado, en un suelo de textura fina observó tasas de flujo de aire de  $100 \text{ cm h}^{-1}$  en superficie (hasta los 5 cm), las que disminuyeron en profundidad, hasta alcanzar aproximadamente  $20 \text{ cm h}^{-1}$  a los 20 cm de profundidad.

Para la condición entrehilera – sobrehilera, la Figura 3 presenta los resultados de dos de los tratamientos en que los comportamientos fueron contrastantes.

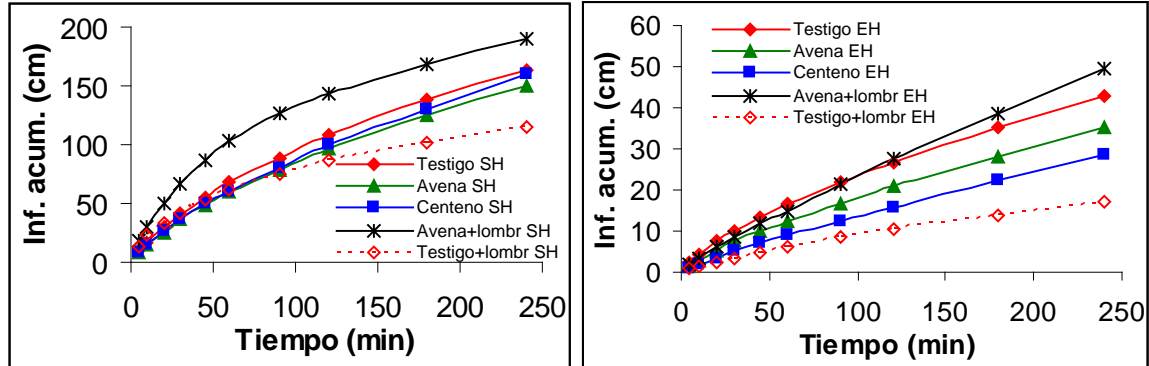


**Figura 3.** Flujo de aire ( $\text{cm h}^{-1}$ ) comparando la condición entre (EH) y sobre hilera (SH) en función de la profundidad. El asterisco (\*) denota diferencias estadísticas ( $p \leq 0,05$ ) a una misma profundidad.

Si bien la cobertura con centeno (T2) en la entre hilera de plantación no generó una alta cantidad de poros gruesos (Cuadro 4), estos tuvieron una mayor continuidad, generando un sistema poroso funcional para el flujo de aire, tanto así que entre los 10-30 cm de profundidad el flujo de aire de la entrehilera fue significativamente mayor a la sobrehilera (Figura 3, izquierda). Esta condición de alta capacidad de flujo de aire con baja cantidad de poros gruesos no concuerda con resultados previos de manejo de enmiendas orgánicas (Poblete, 2011; Valenzuela, 2012), pero es concordante con lo señalado por Dexter *et al.* (2004) en cuanto a la importancia de la continuidad del sistema poroso grueso para asegurar la funcionalidad física del suelo. Para el caso del tratamiento conjunto de avena con inoculación de lombriz (T3), el resultado fue inverso (Figura 3, derecha), ya que la actividad de los anélidos procesando el residuo de la cobertura generó una alta porosidad gruesa en la sobrehilera, con una mayor capacidad de conducción de aire en todo el perfil, aunque sin diferencias estadísticamente significativas.

### Velocidad de Infiltración

En cuanto a la capacidad de conducir agua, evaluada a través de las pruebas de infiltrometría, la Figura 4 presenta los resultados para los tratamientos según ubicación (entre y sobre hilera).



**Figura 4.** Infiltración acumulada (cm) en función del tiempo para pruebas con cilindro infiltrómetro. Nótese que la escala del eje Y no es la misma entre la sobrehilera (SH, izquierda) y la entrehilera (EH, derecha).

La infiltración acumulada depende del contenido de agua inicial del suelo, ya que en la primera etapa de la prueba ocurre un fenómeno de sorción de agua hacia la superficie de las partículas (Radcliffe y Rasmussen, 2002). Si bien para efectos del ensayo el suelo se llevó a capacidad de campo previo a realizar las pruebas de infiltrometría, la diferente distribución de tamaño de poros, continuidad y tortuosidad de estos, así como su estabilidad frente al agua, determinan la funcionalidad del suelo para conducir agua en forma estable en el tiempo. Es así como el tratamiento T3 (Avena + lombrices) presentó la mayor infiltración acumulada, tanto en la sobre como en la entre hilera, sin embargo la pendiente estabilizada (velocidad de infiltración a partir del minuto 90 en adelante) no fue la más alta en la sobrehilera, lo que puede observarse en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Velocidad de infiltración estabilizada ( $\text{cm h}^{-1}$ ) obtenidas de las pruebas de infiltración a partir del minuto 90. Se incluye la razón entre la velocidad de infiltración de la entrehilera ( $VI_{EH}$ ) respecto a la sobrehilera ( $VI_{SH}$ ).

Tratamiento	Velocidad de infiltración estabilizada ( $\text{cm h}^{-1}$ )		$VI_{EH}/VI_{SH}$
	Sobre hilera	Entre hilera	
T0	29,9 bc	8,5 d	0,284
T1	28,4 bc	7,3 c	0,257
T2	31,4 c	6,4 b	0,204
T3	25,2 b	11,2 e	0,444
T4	15,6 a	3,6 a	0,231

Letras distintas corresponden a diferencias significativas de la pendiente estabilizada de la Figura 4, realizada mediante una prueba t ( $p < 0,05$ ).



En la sobre hilera no se generaron diferencias importantes entre los distintos tratamientos, salvo con el T4 (testigo + lombrices), el que presentó los valores menores. Esto podría deberse a posibles efectos de hidrofobia, ya que se esperaba un sistema macro poroso continuo y estable con la acción de las lombrices (Fuentes, 2007), lo que no se vio reflejado en los tratamientos T3 y T4. Los anélidos, al procesar los residuos orgánicos en su tracto digestivo, generan un microagregado (coprolito) que presenta una mayor concentración de arcilla y materia orgánica que el resto del suelo (Brady y Weil, 2000); esta materia orgánica podría estar causando, de acuerdo a Hallet (2008) un efecto de repelencia al agua (hidrofobia), afectando así la humectación del suelo, pero no necesariamente el flujo de aire. Aún así los niveles de velocidad de infiltración (VI) se encuentran en el rango de muy rápido para T0, T1 y T2, y de rápido para T3 y T4 (Casanova *et al.*, 2008).

Para el caso de la entre hilera, todos los valores resultaron menores a la sobre hilera debido al tránsito de maquinaria agrícola. Si bien las comparaciones estadísticas arrojaron mayores diferencias entre tratamientos en la entre hilera, estas no lo son en sentido práctico, ya que el T4 se ubicó en el rango de VI moderada, mientras que el resto de los tratamientos lo hizo en el rango de moderadamente rápida (Casanova *et al.*, 2008).

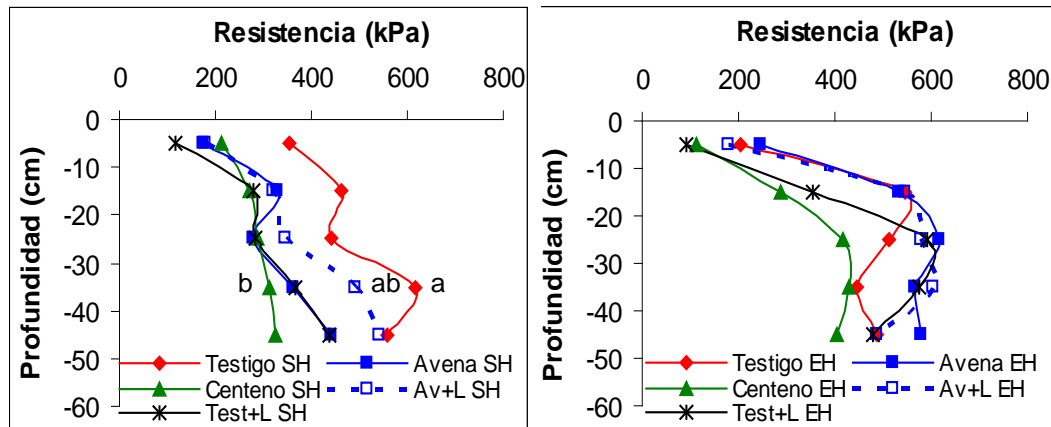
Por otra parte, si el objetivo de los manejos hubiese apuntado a la producción de uva con fines vitícolas, todos los tratamientos, tanto en la entrehilera como en la sobrehilera, estarían por sobre el rango aceptable ( $> 2 \text{ cm h}^{-1}$ ) señalado por Oliver *et al.* (2013) para viñas moderadamente vigorosas. Si se compara la relación entre la velocidad de infiltración de la entrehilera con respecto a la sobrehilera, se observa que solo el tratamiento de avena más lombrices (T3) logró un beneficio por sobre el testigo, presentando una velocidad de infiltración que alcanzó 44,4% de su símil en la sobre hilera.

Poblete (2011), trabajando en un suelo franco arcilloso, obtuvo diferencias significativas entre un tratamiento que contemplaba aplicaciones de estiércol de cabra con respecto a un testigo y otros tratamientos con rotaciones de cultivos anuales. El promedio de velocidad de infiltración estabilizada para el tratamiento con estiércol fue  $44,97 \text{ cm h}^{-1}$ , dado que esta enmienda genera una abundante porosidad gruesa.

Por su parte, Sandoval (2010) en un ensayo con rotaciones de cultivos encontró diferencias para uno de ellos (haba, cebada y chícharo) alcanzando un valor promedio de velocidad de infiltración de  $60 \text{ cm h}^{-1}$ , muy por encima del testigo y las demás rotaciones, que se ubicaron entre  $45$  y  $48 \text{ cm h}^{-1}$ , aproximadamente; sin embargo en dicho ensayo el suelo era de clase textural gruesa, por lo que los niveles de velocidad de infiltración en el presente estudio se encuentran dentro del rango esperado.

### Resistencia Mecánica del suelo

Las Figuras 5 y 6 presentan los resultados de resistencia a la penetración vertical obtenidos con un penetrómetro de punta cónica.



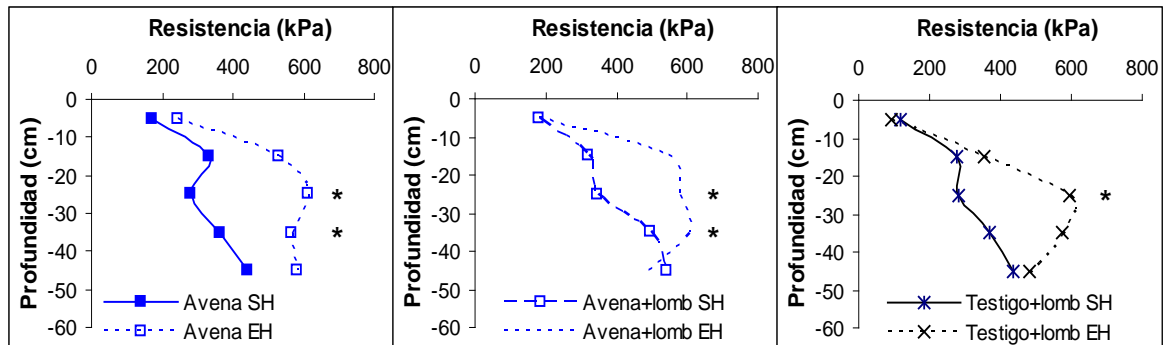
**Figura 5.** Resistencia a la penetración (kPa) de los tratamientos en función de la profundidad de suelo para la condición sobre hilera (SH, izquierda) y entre hilera (EH, derecha). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ).

La evaluación se realizó con suelos a capacidad de campo, 24 horas después de un riego, de manera tal de tener los suelos con un contenido de agua con similar condición energética. El detalle de los resultados se presenta en el Apéndice I. Para la condición de sobre hilera, todos los tratamientos incrementaron en forma gradual la resistencia en profundidad, como consecuencia de la masa sobre yacente de suelo (Schäffer *et al.*, 2010). El testigo, en todo el rango evaluado, mostró valores mayores al resto de los tratamientos, con diferencias estadísticas significativas entre los 30 y 40 cm con respecto a los tratamientos T1, T2 y T4 (avena, centeno, testigo más lombrices). Niveles de entre 200 y 500 kPa comienzan a tener restricción para el crecimiento de raíces, el cual se detiene totalmente con niveles de 2000 kPa (Taylor y Brar, 1991). Sin embargo, Oliver *et al.* (2013) consideran un valor máximo de 1000 kPa, evaluado a capacidad de campo, como límite para tener un suelo con una buena calidad física, por lo que los tratamientos están cercanos al rango límite, en especial el testigo.

En la entre hilera, dependiendo del tratamiento, existen niveles de sobre consolidación entre los 15 y 35 cm de profundidad, lo que estaría acusando un estado de compactación (posible pie de arado). En este sentido, el centeno fue muy eficiente en disminuir la resistencia por debajo de valores críticos de 500 kPa en toda la profundidad evaluada,

aunque sin diferencias estadísticas significativas con el resto de los tratamientos. Trükman *et al.* (2006) señalan que, por efecto del crecimiento vertical de su raíz pivotante, algunas leguminosas son efectivas en disminuir la compactación, siendo marginal el efecto de las gramíneas sobre la resistencia a la penetración. En este sentido, el centeno mostró ser una buena alternativa para suelos compactados, siendo necesario estudiar con mayor detalle su desempeño con respecto a especies leguminosas.

Por su parte, la entrehilera de los tratamientos con cobertura de avena presentaron una alta resistencia mecánica, pero la actividad biológica promovida al depositar el residuo en la sobrehilera generó diferencias entre posiciones dentro del tratamiento (Figura 6).



**Figura 6.** Comparación de la resistencia a la penetración (kPa) de las condiciones sobre y entre hilera. El asterisco indica diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) a una misma profundidad.

Tal como se comentó anteriormente, es posible que al momento de comenzar el ensayo existiese un pie de arado entre 20 y 30 cm de profundidad, el que fue remediado por las coberturas, dado su sistema radical más superficial cuando existe riego, tal como observaron Trükmann *et al.* (2006). Estos autores trabajaron en un suelo (Stagnic Luvisol) con cebada, entre otros cultivos, aplicando diferentes niveles de compactación (1, 3 y 6 pasadas de tractor) encontrando valores de resistencia a la penetración de 2 a 6 MPa, entre 10 y 50 cm de profundidad. Esta diferencia en resistencia a la penetración también se expresó en un aumento en la densidad aparente, por lo que el hábito de enraizamiento superficial de la cebada limita la capacidad de modificar las propiedades en profundidad. Sin embargo, para el presente ensayo es destacable el efecto positivo logrado por la avena en la sobrehilera, como resultado de una reactivación biológica y un aumento de la friabilidad del suelo (Zhang y Hartge, 1995).

Así mismo, destaca el efecto de las lombrices, las cuales ayudaron a disminuir la resistencia mecánica en los tratamientos T3 y T4 (Figura 6).

## Estabilidad de los agregados

### Estabilidad de microagregados

La estabilidad de microagregados se analizó usando la razón de dispersión (RD) que es un parámetro que permite determinar la estabilidad de los microagregados entre 1 y 2 mm de diámetro (Berryman *et al.*, 1982) al comparar una prueba de sedimentación con y sin dispersante químico. Valores altos de RD indican una alta dispersión de los microagregados y, por ende, una baja estabilidad de los mismos. El Cuadro 6 presenta los resultados obtenidos, en términos de razón de dispersión (RD).

**Cuadro 6.** Razón de dispersión (RD, %) para cada uno de los tratamientos a tres profundidades en la sobre hilera. Promedio ( $\pm$  DS).

Tratamiento	RD (%)		
	Profundidad (cm)		
	0-10 cm	10-30 cm	30-50 cm
<b>T0</b>	78,1 ( $\pm$ 16,1)	82,7 ( $\pm$ 15,3)	89,2 ( $\pm$ 3,3)
<b>T1</b>	70,1 ( $\pm$ 23,8)	78,9 ( $\pm$ 25,8)	74,1 ( $\pm$ 19,6)
<b>T2</b>	69,6 ( $\pm$ 19,9)	82,8 ( $\pm$ 16,5)	65,2 ( $\pm$ 0,8)
<b>T3</b>	81,7 ( $\pm$ 19,0)	79,6 ( $\pm$ 18,9)	83,7 ( $\pm$ 8,2)
<b>T4</b>	71,7 ( $\pm$ 29,2)	89,1 ( $\pm$ 4,5)	64,9 ( $\pm$ 28,4)

Si bien casi todos los tratamientos presentaron valores de RD menores al testigo (mayor estabilidad), no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos a una misma profundidad y en la misma ubicación (sobre hilera), lo que también se vio en los resultados de la entre hilera (datos no mostrados). Más aún, todos los resultados pueden ser clasificados según Berryman *et al.* (1982) como muy inestables ( $>$  30%). No se esperaba este resultado, por cuanto los tratamientos T3 y T4, ambos con actividad de lombrices, tenían una mayor probabilidad de incorporar fecas de lombrices (coprolitos) a la muestra analizada. Los coprolitos, precisamente de hasta 2 mm de diámetro, se caracterizan por su mayor concentración de materia orgánica y una mayor estabilidad de agregados (Brady y Weil, 2000), lo que no se vio reflejado en los resultados de la prueba. Es de suponer que al cabo de tres años de haber inoculado con lombrices, éstas no encontraron las condiciones adecuadas y no tuvieron una colonización de todo el volumen de suelo.

### Estabilidad de macroagregados

Para los macroagregados se usó una muestra representativa con unidades de hasta 3 cm de

diámetro, determinando la variación del diámetro medio ponderado, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 7. Al igual que en la prueba anterior, el menor valor denota la mayor estabilidad.

**Cuadro 7.** Variación diámetro medio de agregados (VDMA, cm) para cada uno de los tratamientos a tres profundidades y ubicados en la sobrehilera. Promedio ( $\pm$  DS).

Tratamiento	VDMA (cm)		
	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	30-60
<b>T0</b>	9,15 ( $\pm$ 3,8)	13,79 ( $\pm$ 4,2) a	16,40 ( $\pm$ 1,8)
<b>T1</b>	6,15 ( $\pm$ 4,2)	7,79 ( $\pm$ 2,1) ab	12,59 ( $\pm$ 3,8)
<b>T2</b>	4,27 ( $\pm$ 2,6)	12,18 ( $\pm$ 2,9) a	15,89 ( $\pm$ 2,3)
<b>T3</b>	3,65 ( $\pm$ 2,7)	2,28 ( $\pm$ 0,4) b	11,97 ( $\pm$ 6,4)
<b>T4</b>	10,83 ( $\pm$ 5,6)	10,70 ( $\pm$ 5,5) ab	10,53 ( $\pm$ 4,0)

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos a una misma profundidad ( $p < 0,05$ ).

La degradación y posterior destrucción de los agregados del suelo por efecto del agua, se debe al hinchamiento por hidratación y a la energía cinética del impacto de las gotas de lluvia (Le Bissonnais y Arrovays, 1997; Lado *et al.*, 2004). La destrucción de los agregados se facilita cuando estos se generan por el simple ciclo de mojado/secado, es decir por la tensión generada por el menisco de agua entre las partículas y, en cambio, es más duradera y estable cuando la agregación se genera en presencia de algún cementante químico o físico (Ellies *et al.*, 1995).

Los tratamientos más inestables (VDMA mayor) fueron T4 en la superficie, seguido del testigo, que obtuvo los valores más altos en las dos siguientes profundidades. Se encontraron diferencias significativas para T3 (avena + lombrices) en profundidad (10-30 cm) con respecto al testigo y al T2 (centeno).

La baja estabilidad del tratamiento T4 (testigo + lombrices) se puede deber a que las lombrices, al no poseer una fuente extra de residuos orgánicos, no pudieron adaptarse al medio, presentando una baja proliferación con escaso reciclaje de materia orgánica, siendo los resultados del VDMA similar al testigo. Si bien este tratamiento generó buenos niveles de macroporosidad y de flujo de aire en superficie, no logró dar una buena estabilidad al sistema poroso, por lo que frente a la acción del agua evidenciaron procesos de dispersión, perdiendo funcionalidad en el tiempo, acorde con las pruebas de velocidad de infiltración (Cuadro 5).

La mejor condición promovida por T3 hasta los 30 cm se debe al efecto combinado de la avena con las lombrices. La gramínea tiene un sistema radicular fasciculado y aporta exudados, mientras que las lombrices aceleran los procesos de degradación y generan galerías, aumentando el espacio poroso. La presencia de una cubierta vegetal demostró ser

necesaria para que las lombrices crecieran y pudiesen modificar las propiedades del suelo de manera que fuesen más estables, quedando en evidencia su aporte cuando se compara T3 con T1 (aunque sin diferencias estadísticas significativas), en el que se estableció el cultivo de avena sin lombrices.

### Productividad de la vid

Se dispone de los rendimientos de los tratamientos T0, T1 y T2 para las temporadas 2009-2010 y 2010-2011. El resumen se muestra en el Cuadro 8.

**Cuadro 8.** Producción del huerto para T0, T1 y T2. Para determinar la producción en toneladas por hectárea se supuso un peso de 8 kg por caja.

Tratamiento	Producción promedio (Mg ha <sup>-1</sup> )	
	Temporada 2009-2010	Temporada 2010-2011
Testigo	18,035 a	17,341 a
Avena	17,925 a *	12,423 b
Centeno	17,701 a *	14,563 b

Letras distintas señalan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos durante la misma temporada ( $p < 0,05$ ). El asterisco (\*) denota diferencias estadísticas ( $p \leq 0,05$ ) entre el mismo tratamiento en distintas temporadas.

Si se comparan las diferencias entre tratamientos para una misma temporada, se observa que para temporada 2009-2010 no hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, sin embargo, para la temporada 2010-2011 hubo diferencias de ambos tratamientos de cobertura (T1 y T2) con respecto al testigo.

Los resultados de rendimiento promedio por hectárea de los tratamientos con coberturas fueron menores que el testigo, a pesar que el Centeno (T2) tuvo más racimos por planta (datos no mostrados). Este resultado no responde a lo obtenido en las propiedades físicas del suelo, principalmente densidad aparente, resistencia a la penetración y estabilidad de macroagregados, donde los tratamientos con coberturas y/o lombrices demostraron tener mayor estructuración que el testigo. Sin embargo, tienen coherencia con la distribución de tamaño de poros, donde se aprecia que el testigo tiene una alta proporción de poros de drenaje rápido y agua aprovechable. Arboleya *et al.* (2012), probando distintas rotaciones bajo sistemas de labranza mínima y tradicional, si bien determinaron un incremento del carbono del suelo bajo el sistema de labranza mínima en un periodo de seis años, concluyeron que las propiedades físicas son dependientes de la estación, por lo que es difícil determinar tendencias y encontrar relaciones con los rendimientos comerciales de los cultivos.

Por otra parte, se produjo una disminución en el rendimiento promedio para T1 (avena) y T2 (centeno) comparando la temporada 2009-2010 con la temporada 2010-2011. El testigo,

sin embargo, no tuvo diferencias entre temporadas, por lo que la disminución en los tratamientos con cultivos se podría deber a un efecto negativo de las coberturas vegetales, las cuales competerían por agua y nutrientes con el cultivo principal. Siri-Prieto y Ernst (2012) en un ensayo de cuatro temporadas, establecieron que el uso de gramíneas como cobertura invernal previo a un cultivo de maíz disminuye el contenido de N del suelo, al igual que el contenido de agua al momento de realizar la siembra de maíz, lo que se tradujo en menores rendimientos de este cultivo; este efecto negativo no se observa si se utiliza una leguminosa como cobertura invernal.

A pesar de la disminución en la producción entre temporadas, los rendimientos están sobre la media regional durante el periodo 2010-2012, que fue de 11,7 Mg ha<sup>-1</sup> (IQconsulting, 2012). Sin embargo, tanto los rendimientos en el huerto estudiado como el promedio regional están lejos de alcanzar los 24,6 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento obtenido por algunos agricultores de la región (Ferreyra *et al.*, s.a.).

Es necesario tener presente que en los resultados de productividad del presente ensayo interactuaron tanto las características de la sobrehilera como las de la entrehilera de plantación, en una acción conjunta entre propiedades físicas, químicas y biológicas (Letey, 1985). Esto puede significar dos cosas: primero, que al hacer un balance entre las contribuciones benéficas parciales obtenidas en la sobre hilera y la disminución en la calidad de las propiedades edáficas, producto del laboreo ordinario en la entre hilera de plantación, este último se impuso, generando una disminución en el rendimiento; segundo, que dada la gran cantidad de factores involucrados en el rendimiento habría uno, de gran relevancia, que escapa a este ensayo y las variables que aquí se consideran y que se podría relacionar con efectos alelopáticos y competencia por agua y nutrientes.

Finalmente, un factor importante, además del manejo, es la duración del ensayo: el tiempo desde que se inició el ensayo puede ser muy corto para que se evidencien resultados en la productividad. Si bien existen estudios donde se demostró que el uso de coberturas no afectan los rendimientos comerciales (Poblete, 2011; Valenzuela, 2012), Franzluebbers (2009) señala que los efectos benéficos de la captura de carbono en el suelo se logran en periodos de tiempo mayores a 8 años, por lo que es necesario promover estudios de largo plazo adaptados a las condiciones de producción frutal del país.

## CONCLUSIONES

La utilización de coberturas vegetales, solas o con lombrices, demostró mejorar algunas propiedades físicas relacionadas con la estructura del suelo en la sobrehilera de plantación, destacando el efecto de las gramíneas como alternativa de cultivo de cobertura. Estos cambios fueron efectivos en promedio, hasta los 30 cm de profundidad.

Las gramíneas aumentaron la cantidad de poros de agua útil. A nivel de funcionamiento del sistema poroso, el centeno y la avena, en la sobre y entrehilera, tuvieron los valores más altos de velocidad infiltración estabilizada, respectivamente; así mismo el centeno fue el que presentó la menor resistencia mecánica a la penetración.

El uso de la lombriz de tierra en la sobrehilera de plantación, si bien disminuyó los poros de agua aprovechable, potenció otros resultados, aumentando el flujo de aire, disminuyendo la resistencia mecánica con respecto a la entrehilera y aumentando la estabilidad de agregados cuando actuó asociada a un cultivo de avena.

Sin embargo, los cambios en las propiedades físicas del suelo no se tradujeron en incrementos de rendimiento comercial de uva respecto al testigo, más aún, en la última temporada de evaluación los tratamientos con cobertura de gramínea presentaron una disminución del rendimiento respecto al testigo.



## BIBLIOGRAFÍA

Arbolea, J.; J.C. Gilsanz; F. Alliaume; C. Leoni; M. Falero and S. Guerra. 2012. Minimum tillage and vegetable crop rotation. *Agrociencia Uruguay, Special Issue*: 62-70.

Baginsky, C.; O. Seguel y A. Contreras. 2010. Impacto en la utilización de cultivos y enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo. Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 17. Santiago, Chile. 122 p.

Berryman, C.; D. Davies; C. Evans; M. Harrod; A. Hughes; R. Skinner; R. Swain and D. Soane. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. Formerly Advisory Paper N°18. Reference Book 441. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Swedish. 116 p.

Blanchart, 1992. Restoration by earthworms (*megascolecidae*) of the macroaggregate structure of a destructured Savanna soil under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 24 (12): 1587-1594.

Bouché, M. 1984. Los gusanos de tierra. *Mundo Científico* 40 (4): 954-963.

Brady, N. and R. Weil. 2000. Elements of the nature and properties of soils. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. USA. 559 p.

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.

CIREN (Chile). 1997. Estudio Agrológico V Región, Descripciones de suelo, materiales y símbolos. Tomo I y II. Publicación N° 116. 366p.

Dane, J.H. and J. W. Hopmans. 2002. Water retention and storage. pp: 671-720. In: Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds.) Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. SSSA. Madison, Wisconsin. USA.

Dexter, A.R.; E.A. Czyż and O.P. Gate. 2004. Soil structure and the saturate hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research* 79: 185-189.

Dörner J.; D. Dec; X. Peng y R. Horn. 2009. Efecto del cambio de uso de Typic Hapludand sobre su estructura y función de los poros. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9(3): 190-209.

Ellies, A.; J. Gayoso y M. Velásquez. 1985. Efectos del pastoreo sobre la resistencia al corte en un suelo Dystrandept y Palehumult. *Agro Sur* 13: 84-90.

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* 55 (3-4): 220-225.

Eradat Oskoiu, K.; D. J. Campbell; B. D. Soane and M J. McGregor. 1994. Economics of modifying conventional vehicles and running gear of minimize soil compaction. pp: 539-567. In: B.D. Soane and C. Van Ouwerkerk (eds.) Soil compaction in crop production. Elsevier, Amsterdam, The Netherland.

Farías, E. 2009. Cambio en las propiedades físicas de un suelo en laderas cultivadas con vid (*Vitis vinífera*). Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 40 p.

Ferreya, R.; G. Sellés and M. Morales. s.a. Comportamiento de portainjertos en suelos con limitantes físicas. Cartilla Técnica Proyecto Aumento de la productividad de la Uva de Mesa en el valle de Aconcagua. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA-La Platina. Santiago, Chile. 4 p.

Ferreya, R. 2009. Caracterización de las propiedades físicas de suelo en el cultivo de la uva de mesa en la V Región de Chile. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 42 p.

Franzluebbers, A. I. 2009. Linking soil organic carbon and environmental quality through conservation tillage and residue management. pp: 263-289. In: Lal, R., Follet, R. F (eds.). Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. 2nd Ed. SSSA Special Publication 57, Madison, WI, USA.

Fuentes, V. 2007. Efecto de las lombrices de tierra del tipo anécicas (*Lumbricus friendi*) sobre las propiedades físicas de los suelos en huertos frutales. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 129 p.

Grossman, R.B. and T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. pp: 201-228. In: Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds) Methods of soil analysis. Parth 4. Physical methods. SSSA. Madison Wisconsin, USA.

Hallett, P. 2008. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil and water repellency - a review. *Soil and Water Research*. (Special Issue 1): S21-S29.

Hamza, M.A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82: 121-145.

Hartge, R. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178p.

Horn, R. 1993. Mechanical properties of structured unsaturated soils. *Soil Technology* 6: 47-75.

Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 116: 77-88.

Horn, R. and A. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research* 82: 5-14.

INIA-ODEPA(Chile) 2000. Proyecto sistemas de validación y transferencia de tecnologías de riego sector regado de las provincias de San Felipe y Los Andes. Convenio INIA-ODEPA. Instituto de Investigación Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago. Chile. 52 p.

IQconsulting, 2012. Análisis de resultados operacionales. Sector exportador de fruta fresca, temporada 2010-2011. Capítulo uva de mesa. Encuentro regional FEDEFRUTA- Los Andes- San Felipe. Disponible en: [http://www.fedefruta.cl/regionales2012/Los\\_Andes/charlas/Quiroz.pdf](http://www.fedefruta.cl/regionales2012/Los_Andes/charlas/Quiroz.pdf).

Koolen, A. and H. Kuipers. 1983. Agricultural soil mechanics. Advances Series in Agricultural Sciences 13. Springer Verlag. Berlin, Germany. 241 p.

Lado M.; A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America*. 68:935–942.

Lee, K. E y Foster, R. C. 1991. Soil fauna and soil structure. *Australian Journal of Soil Research* 29: 745-775.

Le Bissonnais, Y. and D. Arrovays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability: Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48: 39-48.

Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Sciences* 1: 277-294.

Lipiec, J. and A. Nosalewicz. 2004. The effects of soil compaction on plant root growth, function and stomatal diffusive resistance. pp:86-93. In: Lipiec J., Walczak R., Józafaciuk G.(eds.). Plant growth in relation to soil physical conditions. Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture. Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences. Lublin, Polonia.

Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.

Oliver, D. P.; R. G. V. Bramley; D. Riches; I. Porter and J. Edwards, 2013. Review: soil physical and chemical properties as indicator of soil quality in Australian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 19 (2): 129-139.

Pathak, P.; S. Wani and R. Rao Sudi. 2011. Long-term effects of management systems on crop yield and soil physical properties of semi-arid tropics of Vertisols. *Agricultural Sciences* 2 (4): 435-442.

Peth, S. 2004. Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten- Auswirkungen auf thermische, hydraulische und mechanische Bodeneigenschaften. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, H. 64, ISSN: 0933-680.

Poblete, L. 2011. Modificación de las propiedades físicas de un suelo de textura fina de la III Región cultivado con vid, mediante la incorporación de materia orgánica en la sobre hilera. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 52 p.

Premalal, B. and B. Deen. 2006. Response of early corn (*Zea mays L.*) growth to soil aggregate size. pp: 195-202. In: R. Horn, H. Fleige, S. Peth and X. Peng (eds.). Soil management for sustainability. Advances in Geocology 38. IUSS. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany.

Radcliffe, D.E. and T.C. Rasmussen. 2002. Soil water movement. pp:85-126. In: Warrick, A. W. (Ed.). Soil physics Companion. CRC Press. Boca Raton, USA.

Reynold, W. D.; D. E. Elrick; E. G. Youngs; A. Amoozegar; H. W. Booltink and J. Bouma. 2002. Saturated and field saturated water flow parameters. pp: 797-878. In: Dane, J.H. and Topp, G.C. (Ed.) Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. SSSA. Madison Wisconsin, USA.

Richards, D.1983. The grape root systems. *Horticultural Reviews* 5:127-168.

Rücknagel, J.; O. Christen; B. Hofmann and S. Ulrich. 2012. A simple model to estimate change in precompression stress as a function of water content on the basis of precompression stress at field capacity. *Geoderma* 177-178: 1-7.

Sandoval, M. 2010. Modificación de las propiedades físicas de un suelo de la III Región cultivado con vid, mediante el uso de especies anuales en la sobre hilera. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 49 p.

Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas; D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, N° 5. 80p.

Santibañez, F.; J. Uribe y V. Vicencio. 1990. Atlas agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Santiago. Chile. 91 p.

Sawchik, I.; M Pérez-Bidegain and C. García. 2012. Impact of winter coover crops on soil properties under soybean cropping systems. pp: 288-293. In: Ernst, O.; Pérez-Bidegain, M.; Terra, J.; Barbazán, M. (eds.). Agrociencia Uruguay. Special Issues. Striving for sustainable high productivity through improved soil and crop management. 344p.

Schäffer, B.; P. Boivin and R. Schulín. 2010. Compressibility of repacked soil as affected by wetting and drying between uniaxial compression tests. *Soil Science Society of America*. 74(5): 1483-1492.

Seguel, O.; V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 63(3): 287-299.

Seguel, O. and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting–drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 221-232.

Seguel, O.; C. Baginsky; A. Contreras; J. Covarrubias; C. Gonzalez and M. Sandoval. 2011. Changes in physical properties of a Typic Haplocambid by anual crop. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 11(1): 1-15.

Sellés, G.; R. Ferreira; R. Ahumada; M. Santelices; J. García- Huidobro; R. Ruiz. 2005. Lombrices de tierra como agentes mejoradores de las propiedades físicas de suelo en huertos frutales. Boletín INIA N° 140. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA- La Platina. Fundación para la Innovación Agraria, FIA. Santiago, Chile. 92p.

Siri-Prieto, G. and O. Ernst. 2012. Effect of legume or grass cover crops and nitrogen application rate on soil properties and corn productivity. Agrociencia Uruguay, Special Issue: 294-301.

Taylor, H. M. and G. S. Brar. 1991. Effect of soil compaction in root development. *Soil & Tillage Research* 19: 111-119.

Trükmann, K.; E. Reintam; J. Kuht and V. Rääts. 2006. Growing of Mugwort (*Artemisa vulgaris L.*), Canadian Thistle (*Cirsium arvense L.*) and Yellow Lupine (*Lupinus lutens L.*) on compacted soil. pp: 362-369. In: R. Horn, H. Fleige, S. Peth and X. Peng (eds.). Soil management for sustainability. Advances in Geocology 38. IUSS. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany.

Valenzuela, F. 2012. Cambios estructurales mediante el manejo de la materia orgánica en un suelo cultivado con vid en el Valle del Huasco, Región de Atacama, Chile. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 42 p.

Warrick, A. (Ed.). 2002. Soil physics companion. CRC Press. Boca Raton. USA. 387 p.

Zhang, H.Q. and K.H. Hartge. 1995. Mechanical properties of soils as influenced by the incorporation of organic matter. pp: 93-108. *In*: K. Hartge and B. Steward (Eds). Soil structure. Its development and function. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, USA.

## APÉNDICE I

Datos de resistencia a la penetración (kPa) obtenidos con penetrómetro de punta cónica (penetrologger). Repeticiones de datos tomados con el suelo a capacidad de campo, ordenados por tratamiento, profundidad y ubicación.  
Promedio por ubicación y profundidad.

Tratamiento	Ubicación	Profundidad (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Testigo	SH	267	409	317	448	401
	SH	363	581	566	795	568
	SH	437	400	446	610	705
	EH	277	458	450	427	534
	EH	234	606	550	423	351
	EH	107	578	538	490	576
Avena	SH	86	189	242	375	378
	SH	175	384	287	332	467
	SH	261	418	306	377	481
	EH	167	503	615	568	583
	EH	338	557	703	542	509
	EH	228	536	527	593	649
Centeno	SH	175	234	339	258	247
	SH	337	341	291	361	311
	SH	123	232	228	317	423
	EH	107	265	388	573	403
	EH	171	365	361	262	343
	EH	65	232	500	452	463
Avena + lombrices	SH	129	137	239	477	556
	SH	64	223	295	494	544
	SH	350	598	503	510	532
	EH	52	285	557	537	487
	EH	147	542	601	658	n.d.
	EH	337	810	579	615	n.d.
Testigo + lombrices	SH	114	239	244	516	594
	SH	148	294	340	340	420
	SH	88	304	263	244	301
	EH	149	368	489	506	480
	EH	61	398	808	714	506
	EH	66	293	482	504	454

SH: Sobre hilera; EH: Entre hilera.

Tratamiento	Ubicación	Profundidad (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Testigo	SH	355	463	443	618 a	558
	EH	206	547	513	446	487
Avena	SH	174	330	278	361 b	442
	EH	244	532	615	568	580
Centeno	SH	212	269	286	312 b	327
	EH	114	287	417	429	403
Avena + lombrices	SH	181	319	346	494 ab	544
	EH	179	546	579	603	487
Testigo + lombrices	SH	117	279	282	367 b	438
	EH	92	353	593	575	480

SH: Sobre hilera; EH: Entre hilera. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ).