

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

**MEMORIA DE TÍTULO**

**DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICAL DE *Triticum turgidum* L.  
BAJO DOS ROTACIONES EN CERO LABRANZA Y LABRANZA  
CONVENCIONAL**

**DIEGO ALEJANDRO FREDES CARPIO**

**SANTIAGO – CHILE  
2017**

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

**Memoria de Título**

**DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICAL DE *Triticum turgidum L.*  
BAJO DOS ROTACIONES EN CERO LABRANZA Y LABRANZA  
CONVENCIONAL**

**DISTRIBUTION OF THE RADICAL SYSTEM OF *Triticum turgidum L.*  
UNDER TWO ROTATIONS IN ZERO LABRANZA AND CONVENTIONAL  
TILLAGE**

**DIEGO ALEJANDRO FREDES CARPIO**

**SANTIAGO – CHILE  
2017**

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

**Memoria de Título**

**DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICAL DE *Triticum turgidum L.*  
BAJO DOS ROTACIONES EN CERO LABRANZA Y LABRANZA  
CONVENCIONAL**

Memoria para optar al Título Profesional de:  
Ingeniero Agrónomo

**DIEGO ALEJANDRO FREDES CARPIO**

Profesores Guías.	Calificaciones
<b>Edmundo Acevedo H.</b> Ingeniero Agrónomo. MS, Ph., D.	7,0
<b>Paola Silva C.</b> Ingeniera Agrónoma, MS, Dra.	6,8
Profesores Evaluadores	
<b>Danilo Aros O.</b> Ingeniero Agrónomo. Ph., D.	6,7
<b>Gabriela Lankin V.</b> Ingeniero Agrónomo. MS, Ph., D.	6,5

**SANTIAGO – CHILE  
2017**

## AGRADECIMIENTOS

Se ha concluido un largo proceso y ya solo queda agradecer a todas esas personas que he conocido y me entregaron las oportunidades para lograr ser una mejor persona durante mi etapa como universitario.

Primero que todo, agradecer a mis profesores guías, la profesora Paola Silva y al profesor Edmundo Acevedo, quienes me formaron durante el desarrollo de mi tesis, apoyándome con sus consejos y opiniones, los cuales fueron fundamentales en la toma de decisiones que constantemente ocurrieron. También cabe mencionar a Marcela Opazo, Rodrigo Savé y Marcos Garrido, todos del laboratorio SAP, los cuales se preocuparon y me ayudaron cuando tuve dudas. De forma especial a Walter Vergara y Marcelo Becerra, quienes compartí en terreno y en el laboratorio, durante mi estadía junto a este hermoso grupo de personas.

También darle las gracias al profesor Oscar Seguel y don Hugo Pérez, los cuales me facilitaron el laboratorio de física de suelo y sus instrumentos para extraer las muestras y poder procesarlas.

A mis amigos de universidad, compañeros de carrera y funcionarios, gracias por esas palabras de apoyo para continuar con mi memoria y a todos esos profesores con los cuales conversé alguna vez y aprendí de ellos, en especial al profesor y amigo Nicola Fiore.

No puedo dejar fuera al pilar fundamental en mi proceso de formación universitaria, que es mi familia, mi madre Verónica y mis hermanas Esperanza y Trinidad, quienes me apoyaron en todo momento, hasta el final de este camino.

Y todas esas personas que estuvieron ahí, muchas gracias.

***“Y que no decaiga la alegría”.***  
*Tomás Maldonado, vocalista de Guachupé.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>5</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>6</b>
<b>Lugar de estudio.....</b>	<b>6</b>
<b>Materiales.....</b>	<b>6</b>
<b>Métodos .....</b>	<b>7</b>
Manejo del cultivo de trigo .....	7
Mediciones en el cultivo .....	7
Muestreo de suelo .....	7
Obtención de raíces.....	8
Largo total de raíces (R).....	9
Densidad radical (Lv).....	9
Contenido de agua en el suelo.....	9
Datos climáticos .....	10
<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....</b>	<b>10</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>Establecimiento de plantas y contenido de agua en el suelo .....</b>	<b>11</b>
<b>Datos climáticos.....</b>	<b>13</b>
<b>Densidad de raíces en profundidad para cada estado fenológico .....</b>	<b>13</b>
Dos Hojas .....	13
Floración .....	14
Madurez fisiológica.....	15

<b>Densidad de raíces en el tiempo .....</b>	<b>16</b>
<b>Estratificación de las raíces en el perfil de suelo .....</b>	<b>17</b>
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA CITADA .....</b>	<b>23</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>28</b>

## RESUMEN

La distribución de raíces en el perfil de suelo depende de sus propiedades físicas, las cuales son modificadas principalmente por el uso de sistemas de labranza y por las rotaciones de cultivos. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto que tienen los sistemas de labranza y dos rotaciones de cultivos en la densidad de raíces ( $L_v$ ) de un cultivo de trigo desarrollado bajo condiciones de secano en un Mollisol de la zona central. Las muestras de raíces se obtuvieron en los estados fenológicos de dos hojas, floración y madurez fisiológica, en la fase de trigo de las rotaciones Raps-Trigo (R-T) y Trigo-Trigo (T-T), de ensayos manejados en labranza cero (NT) y labranza convencional (CT). Las muestras de raíces se colectaron en las profundidades de suelo: 0-2; 2-5; 5-15; 15-30 y 30-55 cm. La densidad radical ( $L_v$ ) se determinó mediante el método de intersecciones de Newman. No hubo interacción entre el sistema de labranza y las rotaciones para ninguno de los estados fenológicos estudiados, por otra parte solo hubo efecto de las rotaciones en el estado de floración observándose mayor  $L_v$  en la rotación raps – trigo ( $4,09 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) que en el monocultivo de trigo ( $3,34 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Los sistemas de labranza provocaron diferencias significativas en  $L_v$  en los primeros 5 cm de profundidad en los tres estados de desarrollo de trigo, siendo mayor en NT que en CT, la mayor diferencia ocurrió en floración con  $7,7 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  en NT y  $5,84 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  en CT. En el resto del perfil, no hubo diferencias en  $L_v$ . Considerando el perfil completo de suelo,  $L_v$  en dos hojas fue de  $47,10 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  en CT y de  $55,96 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  en NT, en floración (máximo de enraizamiento) fue en CT  $112,95 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  y en NT  $121,90 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  y en madurez fisiológica en CT fue de  $78,10 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  y en NT fue de  $86,56 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ . El uso de la rotación raps – trigo genera una mayor homogeneidad de las raíces en el perfil de suelo que el monocultivo de trigo, por otra parte el uso de CT, generó una mayor homogenización de las raíces en el perfil de suelo para los tres estados de desarrollo. En conclusión, el efecto de las rotaciones de cultivos en la densidad de raíces de trigo ocurre en los primeros 5 cm de suelo en el estado de floración, sin embargo la mayor relevancia en los cambios de densidades de raíces es debido a la NT en los primeros centímetros de profundidad para los tres estados de desarrollo. Al considerar todo el perfil de suelo las diferencias significativas en la densidad de raíces ocurren en cero labranza para los tres estados de desarrollo. La estratificación nos muestra que NT concentra sus raíces en superficie y que la rotación de raps – trigo permite que las raíces se distribuyan de mejor forma en el perfil de suelo.

*Palabras clave:* Cero labranza, labranza convencional, densidad de raíces, rotaciones de cultivo.

## ABSTRACT

The root distribution in soil profile depends on their physical properties, which are modified mainly by tillage systems and crop rotation. The objective of this work was to determine the effect of tillage systems and two crop rotation on the root density ( $L_v$ ) of a wheat crop grown under rainfed conditions in a Mollisol in the central zone. Root samples were sampled in the phenological stages two-leaf, flowering and physiological maturity, in the wheat phase of Raps-Wheat (RT) and Wheat-Wheat (TT) rotations, from no tillage (NT) And conventional tillage (CT). Root samples were collected from soil depths: 0-2; 2-5; 5-15; 15-30 and 30-55 cm. The radical density ( $L_v$ ) was determined by the method of Newman intersections. There was no interaction between the tillage system and the rotation for any of the phenological states studied. On the other hand, there was an effect seen in the flowering state in crop rotation, with higher  $L_v$  in raps - wheat ( $4.09 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) rotation than in monoculture wheat ( $3.34 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Tillage systems caused significant differences in  $L_v$  in the first 5 cm of depth in the three stages of development of wheat, being higher in NT than in CT. The biggest difference occurred in flowering stage with  $7.7 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  in NT and  $5.84 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  in CT. In the rest of the profile, there were no differences in  $L_v$ . Considering the complete soil profile,  $L_v$  in two leaves was  $47.10 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  in CT and  $55.96 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  in NT, in the flowering stage (maximum rooting) CT was  $112.95 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  and  $121.90 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  in NT. In the physiological maturity, CT was  $78.10 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  and NT was  $86.56 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ . The use of the raps - wheat rotation generates a greater homogeneity of the roots in the soil profile than the wheat monoculture, on the other hand the use of CT, generated a greater homogenization of the roots in the soil profile for the three states developmental. In conclusion, the effect of crop rotation on wheat root the density occurs in the first 5 cm of soil in the flowering stage, however the greatest relevance in the changes in root densities is due to NT in first centimeters deep for all three stages of development. When considering the whole soil profile, significant differences in root density occur at zero tillage for all three stages of development. The stratification shows that NT concentrates its roots in the surface and that the rotation of raps - wheat allows the roots to distribute better in the soil profile.

Key words: No tillage, conventional tillage, root density, crop rotation.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de labranza influyen en la distribución de las raíces de los cultivos (Huang *et al.*, 2012) debido a que este órgano debe superar la resistencia mecánica del suelo, creciendo a través de los poros, lo cual es permitido en la medida que el diámetro de poros sea mayor al diámetro de la raíz (Shaxson, 2005). Sin embargo, la raíz debe fracturar y/o comprimir el suelo dependiendo de las propiedades físicas que posea, en términos de la textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, porosidad (Ballet *et al.*, 2005; Gregory, 2006) y el contenido de agua (Martino, 2002). Este último, es el factor más determinante para el desarrollo del sistema de raíces de la planta, ya que permite regular la temperatura, la difusión de oxígeno en el suelo, la movilidad de nutrientes como el nitrógeno (Martino, 2002) y la resistencia mecánica del suelo (Gregory, 2005). Un sistema radical que explore un mayor volumen de suelo tendrá una capacidad mayor para extraer nutrientes y agua alojados en el volumen de suelo enraizado, a esto se debe sumar que tenga un enraizamiento lo suficientemente profundo para lograr tomar el agua que se aloja en esas zonas para los periodos de sequía o de máxima demanda (McKenzie *et al.*, 2009). Para considerar ambos factores se debe pensar en la arquitectura y la plasticidad de las raíces que posea el cultivo los que también son afectados por las propiedades intrínsecas del suelo (Bengough *et al.*, 2011).

Se entiende que todos los factores que influyen en la distribución del sistema radical no se pueden tomar en forma independiente ya que están relacionados unos con otros, lo que hace más complejo el análisis cuantitativo del crecimiento de la raíz (Kolb *et al.*, 2012). Si bien las propiedades físicas del suelo como en el contenido de agua, la formación de poros y variación en la estructura del suelo (Martins *et al.*, 2009) son afectadas por el crecimiento y distribución del sistema de raíces, también estas son afectadas por las propiedades químicas siendo relevante la acumulación de carbono orgánico en el suelo (Santos, 2011).

En el sistema de labranza convencional el suelo es invertido, modificando su estructura hasta una determinada profundidad. A mayor profundidad el suelo mantiene las propiedades naturales (Kolb *et al.*, 2012). El sistema de raíces a medida que va creciendo en largo y diámetro provoca una reorganización de la red de poros del suelo (Kolb *et al.*, 2012). La formación de esta red de poros se debe a que una vez que la raíz se descompone en el suelo quedan impresos canales continuos conocidos como "bio-poros", los cuales se mantienen en el tiempo (Jones *et al.*, 2004). Si bien este método de labranza es el más usado, se han generado otros sistemas de labranza que apuntan a la conservación de los suelos como la cero labranza, la cual no hace inversión del suelo para evitar pérdidas en las propiedades físico-químicas producto del movimiento de suelo (Fabrizzii *et al.*, 2009; Melero *et al.*, 2011 y Govaerts *et al.*, 2006). Al momento de la siembra se requiere el paso de cuchillos para separar el rastrojo y generar una pequeña apertura en el suelo para depositar la semilla (Soane *et al.*, 2012). Este sistema de conservación aumenta la población microbiana garantizando una mayor estabilidad y contribuyendo a la formación de poros (Curry *et al.*, 2002; Peigne *et al.*, 2009), a lo que se suma el aumento del contenido de carbono orgánico y el aumento de agua en el suelo (Jacobs *et al.*, 2009). Producto de la acumulación de rastrojo en superficie se

reduce la evaporación del suelo en los primeros centímetros (Soane *et al.*, 2012).

El sistema de labranza convencional puede aumentar la compactación de suelo y eliminar la continuidad del sistema de macro-poros como resultado del paso de maquinaria en cada temporada, formando lo que se conoce como "pie de arado" (Dexter *et al.*, 2004). La presencia de una línea de compactación reduce la densidad de raíces en profundidad afectando el suelo a los 20 cm aproximadamente, donde se encuentra la mayor densidad de raíces de trigo (Long *et al.*, 2014). Un suelo compactado es más propenso a problemas de anegamiento, especialmente en suelos pesados en los horizontes B y C del perfil (Tishchenko, 2010), esto puede afectar el crecimiento de las raíces por una posible hipoxia o anoxia.

La compactación de suelo en un cultivo disminuye la longitud de las raíces, lo que es acompañado con la variación del potencial de agua y el intercambio gaseoso del suelo (Grzesiak, 2013). Se produce una acumulación de las raíces en un pequeño volumen de suelo limitando la extracción de agua y nutrientes en profundidad (White y Kirkegaard, 2010). La reducción del espacio poroso, el aumento de la densidad del suelo a una profundidad específica y poros con diámetros inferiores a 0,2 – 0,3 mm, dificultan la penetración de la raíz (Shaxson, 2005). Una mayor resistencia a la penetración se relaciona de forma inversa con la profundidad de enraizamiento del cultivo (Tracy *et al.*, 2011). Por otro lado, los suelos manejados en cero labranza pueden tener mayor contenido de materia orgánica y una mejor estructura (mayor diámetro de agregados) manteniendo poros de un tamaño superior a 0,3 mm (Shaxson, 2005) y una menor densidad aparente (Huang *et al.*, 2012), lo que es óptimo para la penetración de las raíces en el suelo (Valle, 2004).

Las rotaciones de cultivo en un suelo son un factor fundamental que influyen en la calidad y sustentabilidad de los sistemas agrícolas, ya que este manejo modifica las propiedades físicas del suelo de manera directa (Munkholm, 2013), siempre y cuando el cultivo que antecede al cultivo principal en términos de arquitectura de las raíces sea distinto (Kierkegaard *et al.*, 2008). Los microorganismos usan los restos vegetales de las rotaciones para su crecimiento, lo que mejora de forma directa el suelo (Kindler *et al.*, 2006). Este manejo utilizado especialmente en un sistema de cero labranza se relaciona de manera positiva con una mayor organización de macro-poros en el sistema, un mayor volumen de los poros, una mayor retención de agua (Munkholm, 2013; Glab, 2013) y una mejor estructura del suelo, gracias al aporte de materia orgánica que proporcionan los residuos y las raíces del cultivo (Migliarina *et al.*, 2000). Se observa que en rotaciones con cultivos con sistema radical pivotante, tales como haba y remolacha, hay una mayor cantidad de poros de transmisión, los cuales juegan un papel importante en el movimiento del agua y crecimiento de las raíces del siguiente cultivo (Glab, 2013).

En el caso particular del trigo harinero (*Triticum aestivum L.*), las raíces logran su máximo crecimiento en el estado de floración (Toro, 1979), y su distribución varía según el sistema de labranza. Por otra parte, Valle (2004), evaluó la densidad radical de trigo candeal en los primeros 15 cm de un suelo franco arcillo-arenoso, manejado en los sistemas de cero labranza y labranza convencional donde existió una mayor abundancia de raíces en un suelo no invertido como es el caso de la cero labranza. También, se determinó una mayor densidad

aparente del suelo en labranza convencional en la profundidad de 5 –15 cm, lo cual refleja una reducción del espacio poroso y con ello una posible reducción de la densidad radicular del cultivo a dicha profundidad (Valle, 2004). Este autor no realizó mediciones a mayor profundidad, lo que es de especial interés si se considera que el 80% de las raíces se concentra entre los primeros 30 cm del suelo (Toro, 1979). Por otra parte las raíces de trigo pueden llegar entre los 1,5 y 1,8 m de profundidad en suelos sin alguna limitación física ni de contenido de agua (Allen, 2006). En consecuencia, la respuesta observada por Valle (2004) no puede extrapolarse a mayores profundidades de suelo.

## **HIPÓTESIS**

La densidad de raíces en trigo candeal en el sistema de cero labranza es superior al del sistema convencional de labranza en todo el perfil de un suelo molisol de la Región Metropolitana.

## **OBJETIVOS**

- Determinar la densidad de raíces de trigo candeal en el perfil de suelo manejado en labranza convencional y cero labranza en un suelo molisol de la Región Metropolitana.
- Determinar la densidad de raíces de trigo candeal en perfil de suelo proveniente de las rotaciones de raps – trigo y de monocultivo de trigo en un suelo molisol de la Región Metropolitana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Lugar de estudio

El estudio se desarrolló durante el año 2013 en la Estación Experimental Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°34' S; 70°38' O, y 608 m.s.n.m.) durante los meses de Mayo a Diciembre. Se contó con dos ensayos de sistema de labranza correspondientes a cero labranza (NT) y labranza convencional (CT).

El clima de la zona es templado mesotermal estenotérmico mediterráneo semiárido, el régimen hídrico tiene una precipitación anual de 359 mm concentrada en invierno, con un periodo seco de ocho meses (septiembre a abril). El régimen térmico tiene temperaturas que varían entre una máxima de 28,7 °C en el mes de enero y una mínima en el mes de julio de 4,4 °C, correspondiente al clima tipo Valle Central de Chile (Santibañez y Uribe, 1990).

El suelo pertenece a la Serie Santiago de la familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerol conocido como Molisol de origen aluvial, posee una textura franco arcillo arenosa (FAa) en superficie, topografía plana ( 0 a 1% de pendiente) sin micro-relieve, de colores pardos rojizos a pardos oscuros, con una estructura de bloques sub-angulares de finos débiles a medios finos y una profundidad efectiva que varía entre 30 y 70 cm, sin embargo, las raíces puede seguir penetrando el suelo alcanzando a los 100 cm aproximadamente, con un buen drenaje (CIREN, 1996).

### Materiales

El experimento se llevó a cabo en dos ensayos: labranza convencional (CT) y cero labranza (NT), cada uno de forma independiente. La condición de labranza cero tiene 19 años, en los últimos 9 años se ha realizado una rotación trigo-raps y monocultivo de trigo bajo una condición de secano.

Los tratamientos dentro de cada ensayo fueron la rotación raps-trigo (R-T) y el monocultivo de trigo (T-T) (Cuadro 1). El estudio se llevó a cabo en la fase de trigo de las rotaciones en estudio.

Cuadro 1. Tratamientos para cada ensayo de sistema de labranza.

Tratamiento	Rotación de cultivos
1	Raps-Trigo
2	Trigo-Trigo

El diseño experimental fue en bloques completos al azar (DBCA) con cuatro repeticiones en que la unidad experimental para cada repetición fue una parcela de 5,5 m de ancho y 10 m de largo.

## Métodos

### Manejo del cultivo de trigo

El experimento se ejecutó en condiciones de secano. Se sembró trigo candeal (*Triticum turgidum* L. ssp. Durum) variedad Llaretta-INIA, el 24 de mayo de 2013 con una dosis de semilla de 220 Kg · ha<sup>-1</sup> en ambos ensayos. La distancia entre hileras fue de 0,2 m. Para el caso de la cero labranza no se efectuó inversión de suelo, la siembra fue mecanizada con una sembradora de cero labranza (Semeato SHM 11/13, sembradora directa) y se dejó el rastrojo del cultivo anterior en la superficie, el cual fue picado con una trituradora de rastrojo marca Breviglieri modelo T75. En la labranza convencional, también el rastrojo fue picado con la misma máquina que en cero labranza, posteriormente se hizo una labranza con un arado de vertedera incorporando el rastrojo y luego se ejecutaron dos rastrajes quedando el suelo expuesto al ambiente. La profundidad de siembra para ambos tratamientos fue de 3 cm. No se aplicó fertilización nitrogenada para evaluar el efecto de la fijación de nitrógeno de las leguminosas en el rendimiento de trigo correspondiente a otros experimentos en el mismo lugar de los ensayos, sin embargo, se aplicó fósforo en dosis de 120 Kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> · ha<sup>-1</sup> en la hilera de la siembra ambos ensayos. Para el control de malezas se aplicó herbicidas para malezas de hoja angosta, Metsulfuron metil y 2,4-D en dosis de 10 g · ha<sup>-1</sup> y 1,2 L · ha<sup>-1</sup> respectivamente y la semilla estuvo recubierta por Carbendazin en dosis de 1,25 g · Kg<sup>-1</sup> de semilla. No se regó ya que la condición fue de secano para ambos ensayos.

### Mediciones en el cultivo

**Muestreo de suelo.** Para el muestreo de suelo, se hizo una calicata en cada parcela cuyas dimensiones fueron 50 cm de ancho para cubrir dos entre hileras del cultivo y una profundidad de 60 cm aproximadamente, que es la profundidad del perfil del suelo en ese lugar de la estación experimental. Se muestreó en los estados fenológicos de dos hojas, floración y madurez fisiológica del cultivo.

Las profundidades en las que se tomaron las muestras de suelo para ambos sistemas de labranza fueron de 0-2, 2-5, 5-15, 15-30 y 30-55 cm. Las muestras se extrajeron desde las entre hileras del cultivo con dos tipos de cilindros metálicos, cuyos volúmenes fueron de 56,5 cm<sup>3</sup> (para la obtención de muestras en las profundidades de 0 a 5 cm) y 141,4 cm<sup>3</sup> (obtención de muestras que van desde los 5 a 60 cm). Las muestras fueron almacenadas y selladas en capsulas de aluminio. Finalmente, para evitar la descomposición de raíces se redujo el contenido de agua del suelo a punto de marchitez permanente, para lo cual las muestras fueron secadas en una estufa de aire forzado a 105° C durante 24 horas.

**Obtención de raíces.** Cada muestra de suelo seco se colocó en un recipiente de 250 mL junto a una solución de agua destilada y Hexametáfosfato de Sodio 1 N durante 20 minutos para dispersar los componentes de la muestra, luego fue llevada a un agitador de Bouyoucos durante cinco minutos. Posteriormente la suspensión se depositó en un elutriador, que consiste en un aparato de flujo ascendente (Fig. 1), que consiste en hacer circular una corriente de agua a través de un tubo deacrílico transparente en posición vertical, permitiendo que las partículas de arena decanten y salga del sistema (Toro, 1979).

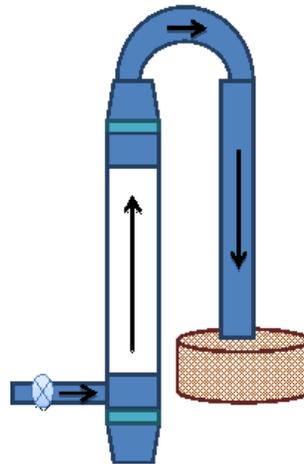


Figura 1. Aparato de flujo ascendente.

Por otro lado, los restos de materia orgánica y de raíces se depositaron en un tamiz de 0,18 mm. El limo y la arcilla que también fueron trasladados por el fluido atravesaron el tamiz quedando descartados. La velocidad con que el fluido se mantuvo circulando fue de  $0,07 \text{ Km} \cdot \text{h}^{-1}$ , hasta que el agua recuperó su transparencia y no quedaron raíces dentro del tubo.

Los elementos que quedaron depositados en el tamiz se llevaron a un vaso precipitado con agua. Posteriormente se aplicó una solución de agua con detergente que redujo la tensión superficial del agua y evitó que las raíces quedaran adheridas al vaso y pudieran separarse de mejor forma entre ellas cuando se transfirieran al papel filtro ubicado sobre un embudo de Büchner y este último sobre un matraz kitasato. Todo esto se acopló una bomba de vacío, para extraer la solución en la que se encontraban las raíces (Fig. 2) (Toro, 1979).

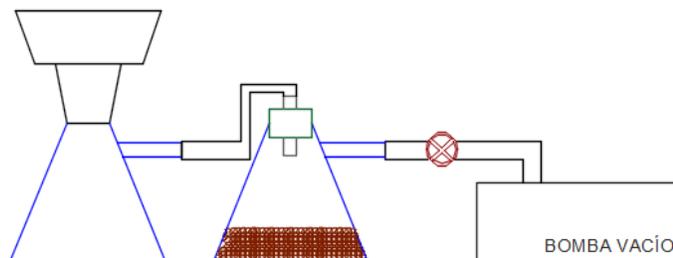


Figura 2. Sistema de extracción de agua de las raíces.

**Largo total de raíces (R).** Para cuantificar la longitud de raíces se ocupó el método de las intersecciones (Newman, 1966) que consiste en distribuir las raíces de forma a la azar sobre un reticulado, contar las intersecciones entre la raíz y el reticulado para obtener el largo de las raíces con la ecuación formulada por Newman (Ec. 1). Se usaron dos láminas transparentes de acrílico, una estuvo reticulada y en ella se marcaron cuadrados con un mismo largo en sus lados y que no estén de forma adyacente, teniendo 25 cuadrados de un 1 cm de largo en cada lado. Se colocó el papel filtro con las raíces dispersas y sobre estas se colocó la lámina con el reticulado, para luego contar las intersecciones que hay entre las raíces y las líneas que están en la lámina, una intersección válida ocurrió cuando la raíz atravesó de forma clara uno de los lados de estos cuadrados. Para lograr diferenciar las raíces del resto de la materia orgánica, se estableció como criterios el color y forma de la raíz, siendo característicos una vez secados un color amarillo-ámbar a ámbar-pardo en luz, posee bordes sinuosos producto de la tortuosidad de la red de poros del suelo, a medida que va creciendo y la resistencia del suelo que se opone a la raíz, por otro lado, los restos vegetales son de color amarillentos de bordes rectos y aguzados.

Con la información obtenida se procedió a calcular el largo total de las raíces, según la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\pi * A * N}{2 * H} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde “R” corresponde al largo total de las raíces (cm), “A” es la superficie total en que se depositan las raíces (cm<sup>2</sup>), ”N” es el número de intersecciones que hay entre las raíces y las líneas de los cuadrados que se ubican en la lámina de acrílico. “H” es el largo total de las rectas de los cuadrados dibujados en la lámina (cm).

**Densidad radical (Lv).** La densidad de raíces (Lv) para cada profundidad, se estimó a partir de la siguiente ecuación (Ec.2).

$$Lv = \frac{R}{V} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde “R” corresponde a la longitud total de la raíz (cm) y “V” al volumen que posee el cilindro que se empleó para extraer las muestras de suelo (cm<sup>3</sup>). El valor de “Lv” está expresado en cm · cm<sup>-3</sup>.

**Contenido de agua en el suelo.** El contenido de agua en el suelo se obtuvo a partir de muestras de suelo colectadas en los estados del cultivo de dos hojas, floración y madurez fisiológica en las profundidades anteriormente señaladas. Las muestras colectadas fueron colocadas en cápsulas de aluminio, selladas y llevadas al laboratorio para proceder a pesarlas, luego las muestras de suelo fueron secadas en estufa a 105 °C hasta peso constante, la diferencia de peso correspondió al peso de agua de la muestra la que fue dividida por el peso seco de la muestra, expresándose así el contenido de agua en terminos gravimétricos (Top y Ferré, 2002).

**Datos climáticos.** Se obtuvieron los datos climáticos de temperaturas mínimas y máximas diarias y precipitación diaria desde la estación meteorológica ubicada en la Estación Experimental La Platina durante el tiempo que el ensayo estuvo.

### **Análisis estadísticos**

Se verificó los supuestos estadísticos de normalidad del error y homogeneidad de la varianza. Se realizó un análisis combinado de varianzas con dos factores que corresponden a sistema de labranza para cada profundidad estudiada (SL/PROF) y rotaciones de cultivos (ROT). A su vez se hizo un anidado del Bloque en el SL/PROF, permitiendo evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la densidad de raíces entre los distintos sistemas de labranza y profundidades. Por otro lado, se analizó el crecimiento de raíces con respecto a “Días después de la siembra” (DDS) y la estratificación de raíces en base a dos factores que correspondieron a Estado fenológico - Sistema de labranza (ESTADO-SL) y rotación (ROT), el Bloque se anidó al ESTADO-SL. Las comparaciones entre medias se realizaron con la prueba de DGC cuando se encontraron diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%. La prueba DGC es un método particionante, es decir, sin solapamiento de letras entre medias (Di Rienzo *et al.*, 2001).

Los análisis se efectuaron con el software estadístico Infostat versión estudiantil.

## RESULTADOS

### Establecimiento de plantas y contenido de agua en el suelo

La interacción Sistema de labranza x Rotación en el establecimiento de plantas, para ambos ensayos entre los dos tratamientos fue significativa ( $p \leq 0,05$ ). En la Figura 3 se observa que la labranza convencional (CT) tuvo un mayor establecimiento de plantas con respecto a la cero labranza (NT), de 329 plantas  $m^{-2}$  promedio para el trigo proveniente de ambas rotaciones. Por otro lado, en NT existió un mayor establecimiento de las plantas de trigo en la rotación Raps – Trigo ( $p < 0,05$ ) que en el monocultivo de trigo.

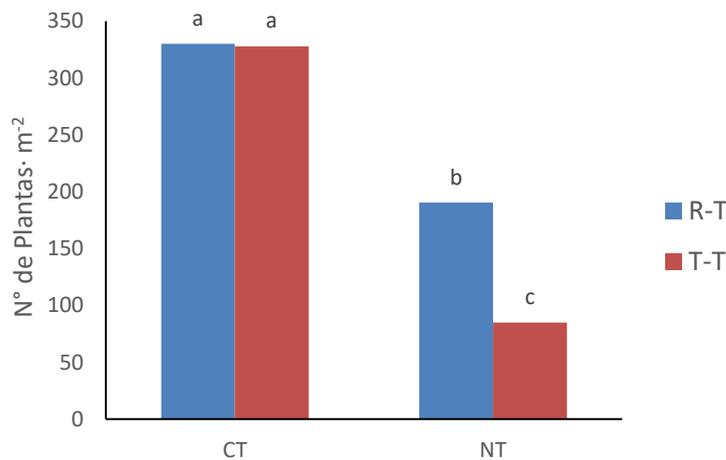


Figura 3. Establecimiento de plantas de trigo de las rotaciones de Raps – Trigo (R-T) y del monocultivo de Trigo (T-T), en los sistemas de cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un valor de significancia de 5%.

Pese a las diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en el establecimiento (Fig.3), no existió asociación entre establecimiento de plantas y la densidad de raíces para ninguno de los estados fenológicos evaluados en el cultivo (Cuadro 1).

Con respecto al contenido de agua en el suelo, no hubo interacción Estado-sistema de labranza x Rotación ( $p < 0,05$ ), por lo que cada factor se analizó de forma independiente. No hubo diferencias significativas para las rotaciones de Raps-trigo y el monocultivo de trigo ( $p < 0,05$ ) en ninguno de los tres estados fenológicos evaluados.

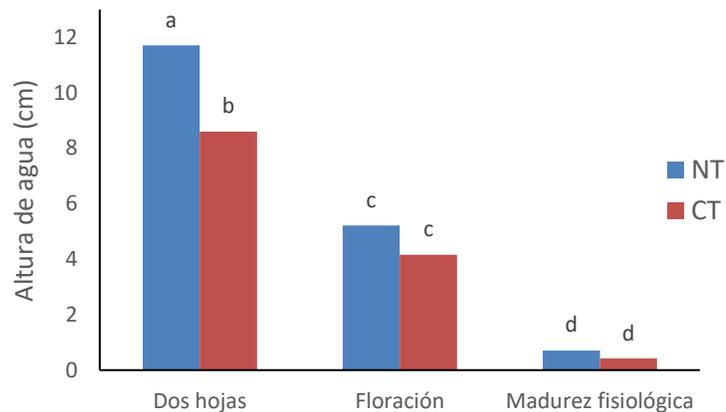


Figura 4. Contenido de agua del suelo, medido como altura de agua (cm) en los sistemas de cero labranza (NT) y labranza convencional (CT) para los estados de dos hojas, floración y madurez fisiológica. Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un valor de significancia de 5%.

En cuanto al contenido de agua en el suelo hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los estados de desarrollo, donde el estado de dos hojas fue mayor en comparación al estado de floración y de madurez fisiológica (Fig. 4). El mayor contenido de agua del suelo de forma estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) fue en labranza cero (NT) en comparación a la labranza convencional (CT) para el estado de dos hojas, para los demás estados fenológicos no hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los sistemas de labranza.

Cuadro 1. Correlación de la densidad de raíces con respecto al establecimiento de plantas y contenido de agua en el suelo para cada estado fenológico ( $n=20$ ).

	Lv ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ )		
	Dos hojas	Floración	Madurez Fisiológica
	r	r	r
Establecimiento ( $n^\circ$ de plantas $\cdot \text{m}^{-2}$ )	0,13 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>
Contenido de agua (cm)	0,11 <sup>ns</sup>	-0,58*	-0,85***

\*  $p \leq 0,05$ ; \*\*\*  $p \leq 0,001$ ; n.s: no significativo, valor de significancia de un 5%

Pese a las diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en el contenido de agua del suelo, en el estado de dos hojas, no existió una correlación entre el contenido de agua en el suelo y la densidad de raíces (Cuadro 1), sin embargo, en los estados de floración y madurez fisiológica, esta fue negativa y significativa. A mayor densidad de raíces, el contenido de agua en el suelo fue menor (detalles en el Anexo 4).

## Datos climáticos

Se consideró como variables de mayor importancia las temperaturas medias y las precipitaciones acumuladas durante el crecimiento del cultivo de trigo durante el año 2013, como se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 2. Temperatura y monto de precipitaciones acumuladas durante el crecimiento del cultivo de trigo.

	Período de crecimiento del cultivo (meses)							
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura máxima (°C)	16,3	18,7	15,8	17,7	18,7	23,7	26,6	29,1
Temperatura mínima (°C)	4,6	3,0	2,7	2,8	4,5	6,6	8,2	11,5
Temperatura media (°C)	10,4	10,9	9,3	10,3	11,6	15,2	17,4	20,3
Precipitación acumulada (mm)	83	9	3	35	6	0	0	0

## Densidad de raíces en profundidad para cada estado fenológico

### Dos Hojas

Existió una dinámica de crecimiento de la densidad de raíces a medida que el cultivo va cumpliendo sus etapas de desarrollo. Para el estado de dos hojas, al realizarse el análisis combinado de varianza no se encontró interacción Sistema de labranza/Profundidad x Rotación ( $p < 0,05$ ) por lo que se analizó por separado las variables de Sistema de labranza y rotación.

El uso de las rotaciones de cultivo, de raps – trigo (R-T) y el monocultivo de trigo (T-T), no generaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la densidad de raíces para las distintas profundidades evaluadas.

En relación a la densidad raíces y los sistemas de labranza (Fig. 5), a partir de los 5 cm de profundidad la densidad radical se redujo en un 75% de lo observado en superficie, mostrándose una tendencia a una mayor densidad de raíces en el trigo proveniente de cero labranza, este comportamiento se mantuvo en profundidad. Hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la densidad de raíces en los primeros 5 cm de profundidad de suelo entre cero labranza ( $3,53 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) y labranza convencional ( $1,68 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Posterior a los 5 cm de profundidad, no hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en profundidad, ni entre los sistemas de labranza.

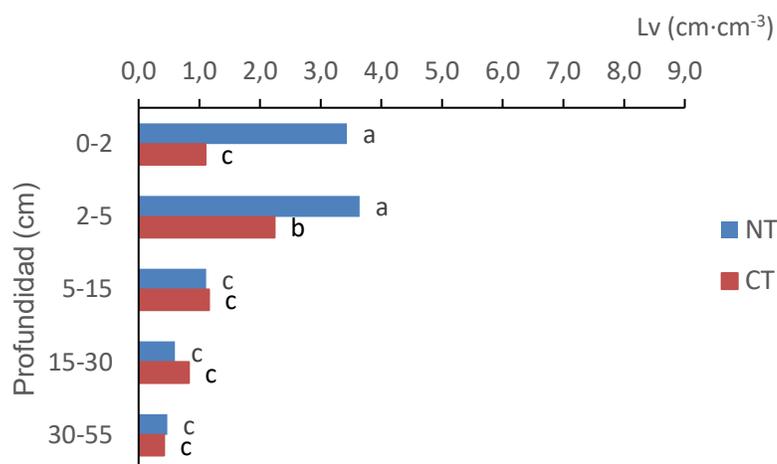


Figura 5. Densidad de raíces ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) para el estado de dos hojas en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

### Floración

Se realizó el análisis combinado de varianza, donde no hubo interacción Sistema de labranza/Profundidad x Rotación ( $p < 0,05$ ) por lo que las variables sistema de labranza/Profundidad y rotación se analizaron de forma separada.

El uso de las rotaciones de cultivo generó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la densidad radical de trigo, para el estado de floración. El cual muestra que un pre-cultivo como el raps genera una mayor cantidad de raíces en trigo ( $4,09 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), con respecto al uso de un monocultivo de trigo ( $3,34 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) (Fig. 6).

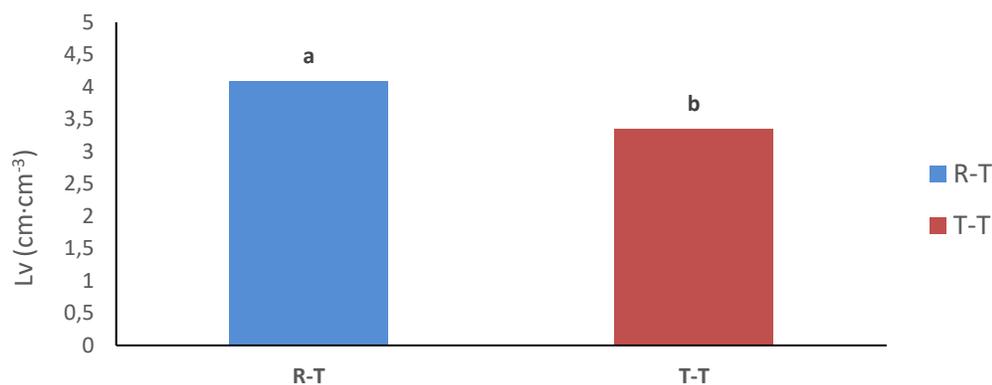


Figura 6. Densidad de raíces ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) para el estado de floración de trigo proveniente de dos rotaciones: Trigo-Raps (T-R) y monocultivo de trigo (T-T). Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

En el estado de floración hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la profundidad y entre sistemas de labranza. De 0 – 2 cm, se observa una mayor la densidad de raíces en la cero labranza ( $8,52 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) con respecto a la labranza convencional ( $6,32 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), esta diferencia se mantiene como tendencia entre 2 – 5 cm (Fig. 6). Posterior a los 5 cm de profundidad la densidad de raíces disminuyó de forma estadísticamente significativa, sin generar diferencias que sean significativas ( $p < 0,05$ ) entre las profundidades ni entre los sistemas de labranza (Fig. 7).

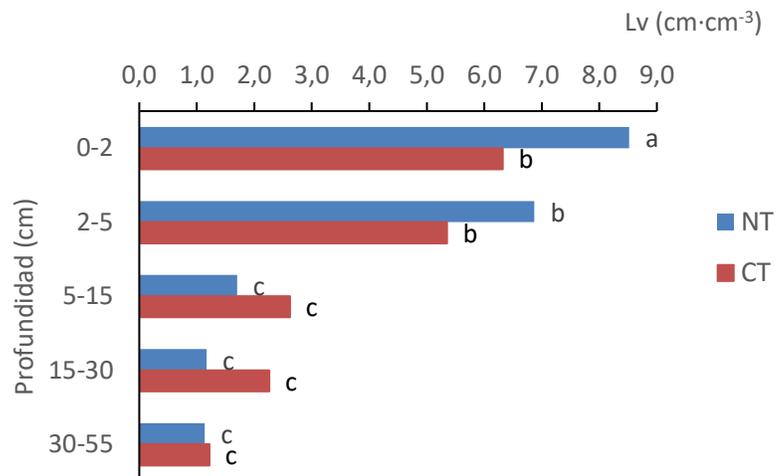


Figura 7. Densidad de raíces ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) para el estado de floración de trigo en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

### Madurez fisiológica

Al realizar el análisis combinado de varianza, no existió interacción Sistema de labranza/profundidad x Rotación ( $p < 0,05$ ) por lo que las variables se analizaron por separado. No hubo diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) en la densidad de raíces entre las rotaciones de raps – trigo (R-T) y el monocultivo de trigo (T-T) para el estado de madurez fisiológica.

En cambio hubo diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) en la densidad de raíces en cero labranza con respecto a la labranza convencional ( $5,02$  y  $3,35 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  respectivamente) entre 0 – 5 cm de profundidad (Fig. 8). Posterior a los 5 cm, no hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), tampoco entre los sistemas de labranza (Fig. 8).

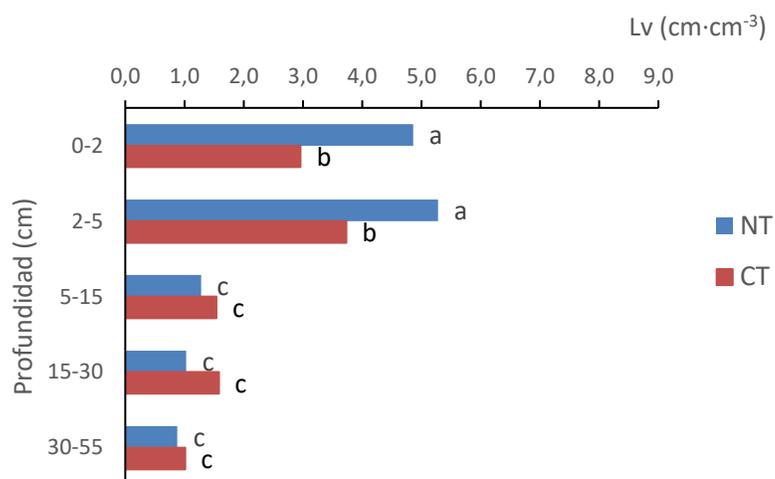


Figura 8. Densidad de raíces ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) para el estado madurez fisiológica en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

### Densidad de raíces en el tiempo

Al realizar el análisis combinado de varianza para la densidad de raíces, no hubo interacción Sistema de labranza/Estado de desarrollo x Rotación ( $p < 0,05$ ) por lo que se analizó cada factor en forma separada. Con respecto al uso de las rotaciones de cultivos, estas no generaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la densidad de raíces. En cambio sí se observó diferencias estadísticamente significativas producto del sistema de labranza y el estado de desarrollo del cultivo. En la Figura 9 se observa la evolución de  $L_v$  ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) en el tiempo considerando todo el perfil de suelo para los tres estados fenológicos del cultivo de trigo

La mayor densidad de raíces de trigo estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) se observó en el estado de floración, y en este mismo estado hubo diferencias entre los sistemas de labranza, observándose un mayor  $L_v$  en cero labranza por sobre labranza convencional ( $121,90 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  y  $112,95 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-2}$  respectivamente). Para los estados de dos hojas como el de madurez fisiológica no hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los sistemas de labranza, sin embargo, fue mayor el largo de raíces por  $\text{cm}^2$  en madurez fisiológica que en dos hojas ( $p < 0,05$ ).

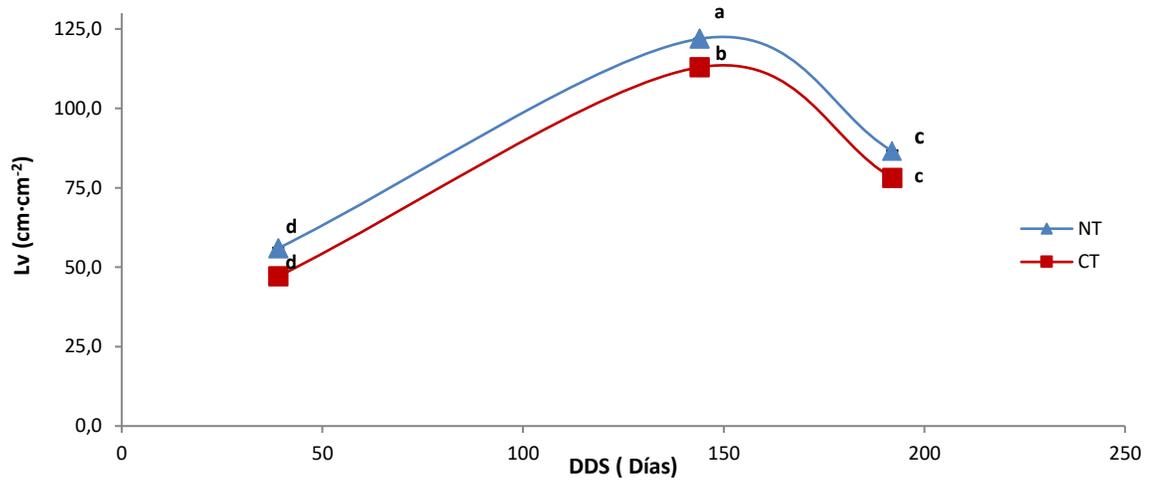


Figura 9. Densidad de raíces ( $L_v$ ) ( $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) totales de trigo en los estados de dos hojas, floración y madurez fisiológica en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Letras diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

### Estratificación de las raíces en el perfil de suelo

A partir del análisis de densidad de raíces en el perfil de suelo en los sistemas de labranza y rotaciones, se calculó la relación existente entre  $L_v(0-5\text{ cm})/L_v(5-55\text{ cm})$  (Fig. 10). Al realizar el análisis combinado de varianza no existió interacción Sistema de labranza/Estado de desarrollo x Rotación ( $p < 0,05$ ) por lo que cada variable se analizó de forma independiente.

El uso de rotaciones (Fig. 10) generó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), en la distribución de las raíces ( $L_v(0-5\text{ cm})/L_v(5-55\text{ cm})$ ) en el perfil de suelo. Existiendo una mayor concentración de las raíces en superficie con el uso de un monocultivo de trigo (T-T) ( $p < 0,05$ ) que con la rotación raps - trigo (R-T).

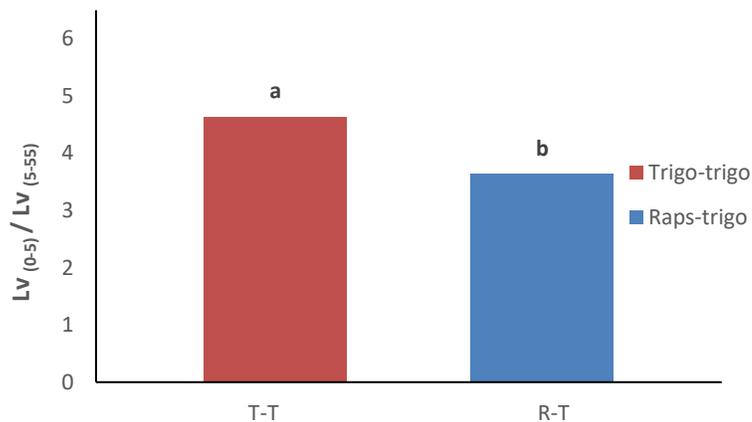


Figura 10. Estratificación de las raíces de trigo en la rotación de Raps – Trigo (R-T) y el monocultivo de trigo (T-T). Letras minúsculas diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

Con respecto a la estratificación de raíces en los sistemas de labranza (Fig. 11), también hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), donde la mayor concentración en superficie fue en cero labranza (NT). Por otra parte en la labranza convencional (CT) la distribución fue más homogénea en el perfil de suelo. La distribución de raíces durante el desarrollo del cultivo no presentó cambios significativos ( $p < 0,05$ ) en los dos sistemas de labranza.

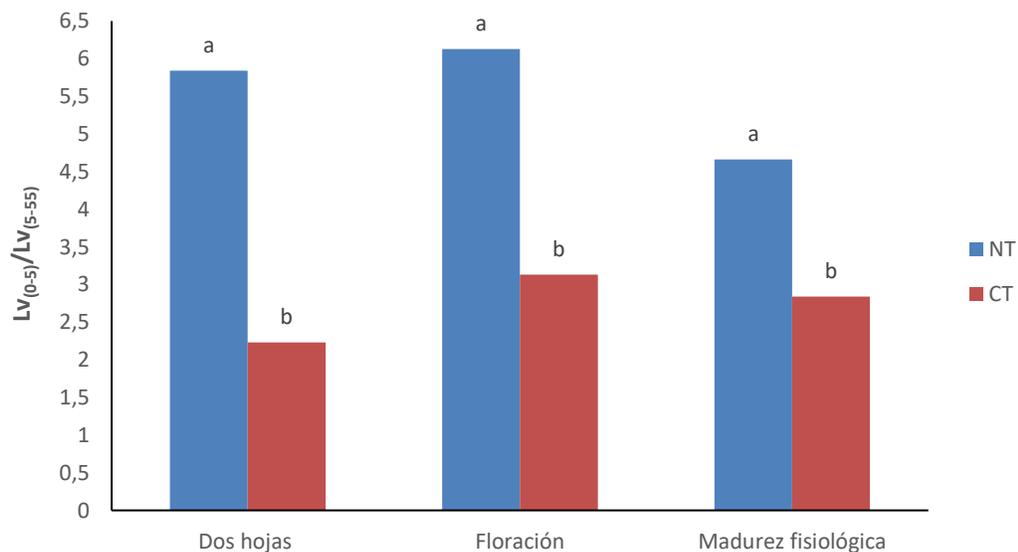


Figura 11. Estratificación de las raíces de trigo en dos hojas, floración y madurez fisiológica en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Letras minúsculas diferentes indican diferencias entre las medias con un  $p \leq 0,05$ .

## DISCUSIÓN

La densidad de raíces de trigo cambio principalmente debido a los sistemas de labranza, situación ya informada por Martínez *et al.* (2008) y Huang *et al.* (2012) quienes obtuvieron similares resultados. Estas diferencias sólo se observaron dentro de los primeros 5 cm de profundidad siendo mayor en cero labranza que en labranza convencional lo que tiene sentido con lo mencionado por Muñoz *et al.* (2010), Lampurlanés *et al.* (2001) y Guan *et al.* (2015). Por otro lado Qin *et al.* (2004), menciona que el 65% de las raíces se concentran a los 30 cm del suelo, sin embargo la mayor densidad de raíces se ubica entre los 0 – 10 cm de profundidad (Liu *et al.*, 2011; Guan *et al.*, 2015), que según otros autores es la profundidad en la cual las raíces tienen la mayor actividad en términos de absorción (Liu *et al.*, 2011; Guan *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2012).

Otra explicación a la mayor densidad de raíces en los primeros 5 cm en cero labranza puede deberse a la concentración de carbono a partir de la materia orgánica en las capas superiores del suelo lo que provoca una mayor actividad de las raíces por adquirir los nutrientes necesarios para la planta (Hernaz *et al.*, 2002; Fageria *et al.*, 2004), lo que se traduce en una densidad de raíces mucho mayor para el caso particular de cero labranza favorecido por una mejor estructura del suelo y el tamaño de los poros que es mayor, que condice con los resultados que obtuvo Vergara (2016) en términos de estabilidad de agregados y en la calidad de poros que presenta el suelo, lo que permite el paso de la raíz por el suelo sin tener un gasto energético mayor, por otro lado el contenido de agua es superior que en la labranza convencional, debido a que este último posee una baja retención y alta evaporación, lo cual permite que exista un crecimiento mayor de raíces en el suelo manejado en cero labranza (Muñoz *et al.*, 2010; Guan *et al.*, 2015).

Toda especie de cultivo difiere en el crecimiento (Liu *et al.*, 2011) y distribución de raíces en el suelo especialmente cuando se encuentra bajo condiciones de estrés (Benjamin y Nielsen, 2006). Muñoz (2012), menciona que el contenido de agua en el suelo es un factor vital para la dinámica de crecimiento de las raíces, a partir de esto se explica que las raíces siguen un patrón de crecimiento cuando el contenido de agua es normal en el suelo, donde la cantidad de raíces en superficie es mayor y que este va decreciendo a medida que aumenta la profundidad de enraizamiento, un bajo contenido de agua en el suelo provoca una reducción de la cantidad de raíces en superficie, pero en profundidad es levemente mayor (Qin, 2004; Liu *et al.*, 2011). Esto guarda relación con los resultados obtenidos y las precipitaciones de la temporada, donde la mayor densidad de raíces y el notorio patrón de crecimiento existen en cero labranza la cual posee el mayor contenido de agua desde un comienzo, sin embargo las bajas precipitaciones que existieron ese mismo año repercuten en la baja densidad de raíces para todo el perfil de suelo especialmente en los primeros 5 cm de profundidad.

A pesar de los beneficios con el uso de la cero labranza, en ambas rotaciones estudiadas, se ve una disminución de la densidad radical, entre los 10 a 20 cm de profundidad lo cual coincide con los resultados obtenidos por Ishaq *et al.* (2001), quien menciona que a partir de

los 15 cm, hay una reducción notoria de la densidad de raíces, generándose una asociación de forma inversa entre el largo de la raíz y el aumento de profundidad del suelo. Qin et al., (2004) explica de una forma más general que los sistemas de labranza pierden el efecto en el aumento de la densidad de raíces a partir de los 30 cm, por el aumento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración en profundidad, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Vergara (2016) en un estudio de las propiedades físicas del suelo bajo el sistema de labranza convencional y de cero labranza hecho en la misma temporada y lugar de donde se extrajo la muestra de raíces de este estudio, dando como resultado una reducción del diámetro de poros, dificultando el avance de este órgano por el suelo, ya que el suelo se va asentando debido al paso de la maquinaria, situación que ocurre para ambos sistemas de labranza (Ishaq, 2001; Outoukarter et al, 2010; Hou et al., 2011; Pearson. 1991).

La rotación no tuvo efecto en la densidad de raíces para el estado final de madurez fisiológica, probablemente por la mayor sensibilidad del cultivo de trigo al déficit hídrico cuando está en su fase de crecimiento limitando el crecimiento (Liu et al., 2011), situación a la que están sometidas las rotaciones en estudio dado el clima mediterráneo, con una muy baja precipitación durante el tiempo que fue ejecutado los experimentos en el campo. El escaso efecto de la rotación, también se puede deber a la mayor estabilidad de agregados del suelo en cero labranza, lo que hace que no haya un efecto preponderante del uso de la rotación (Hernanz, 2001). En floración si hubo un efecto de las rotaciones, entendiéndose que para este estado fenológico, las raíces alcanzan su máximo crecimiento (Toro, 1979; Lampurlanés, 2001; Valle, 2004; Huang *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2011) y donde el uso de un pre-cultivo con un sistema pivotante como el raps permitió que la densidad de raíces de trigo fuese mayor, lo que guarda relación con lo descrito por Glab (2013). Es importante considerar que los resultados que se obtienen en el estudio de las raíces, tienen un alto error experimental (Toro, 1979) lo que también afecta la falta de diferencias significativas estadísticamente, producto de que las muestras obtenidas en campo pueden variar por la heterogeneidad del suelo, en las distintas parcelas y profundidad de muestreo.

En la distribución de raíces en el perfil de suelo, el efecto de la rotación muestra que la implementación de un sistema de radical pivotante, permite que la distribución sea más homogénea en el perfil de suelo. El sistema radical del raps, al ser pivotante tiene la capacidad de extender sus raíces en profundidad superando la resistencia mecánica que ofrece el suelo (Liu *et al.*, 2011), esto se ve reflejado cuando se compara los resultados obtenidos por Vergara (2016) y la densidad radical del raps, donde se observa que existe una mayor resistencia a la penetración en los primeros centímetros de profundidad en el sistema de cero labranza, sin embargo la mayor densidad de raíces ocurre para la rotación de raps – trigo en todo el perfil, de forma contraria actúa el sistema de raíces del monocultivo de trigo las cuales siendo fasciculadas generan un aglutinamiento solo en superficie. Liu *et al.* (2011), explica que cuando existe una bajo contenido de agua en el suelo, las raíces reducen su crecimiento y por lo tanto no exploran en profundidad, si a esto se suma una alta resistencia a la penetración en profundidad, limitando el crecimiento radical en profundidad.

Con respecto al sistema de labranza, la labranza convencional mostró una mayor homogeneidad de las raíces en profundidad con respecto a la cero labranza. Las raíces de

trigo en un suelo labrado pueden crecer por el suelo mucho más rápido en los primeros centímetros de profundidad ya que este no tiene una estructura definida y por lo tanto la resistencia a la penetración es baja al momento de emerger (Huang et al., 2012).

A modo de mejorar las condiciones del cultivo en el campo, y como una alternativa para mejorar el enraizamiento tanto en profundidad como el aumento de la densidad de las raíces de trigo en condiciones de secano, se puede emplear rotaciones de cultivos alternando cultivos con un sistema de raíces fasciculado y posteriormente un cultivo con sistema radical pivotante, para evitar asentamiento del suelo en los distintos sistemas de labranza. Por otra parte el cambio de labranza convencional a cero labranza permitiría aumentar la disponibilidad de agua en el perfil de suelo gracias a una mejora de la estructura de este, siendo una ayuda en los periodos de baja precipitaciones.

## CONCLUSIÓN

Con relación al efecto de la rotación de cultivos (raps – trigo y monocultivo de trigo) y los sistemas de labranza (cero labranza y labranza convencional) en la densidad del sistema radical de trigo de esta memoria, se concluye que:

La densidad de raíces de trigo, es superior en cero labranza que en labranza convencional en los primeros 5 cm, durante los tres estados de desarrollo estudiados (dos hojas: 3,54 y 1,67; floración: 7,7 y 5,84; madurez fisiológica: 5,07  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  y 3,35  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  respectivamente), sin embargo en el resto del perfil no hubo cambios significativos en la densidad radical. La distribución de raíces en el perfil de suelo, se comportó de igual forma en los tres estados de desarrollo, en donde hubo una mayor concentración de raíces en la parte superior del suelo para luego disminuir conforme iba en aumento la profundidad del suelo.

La cero labranza afecta de forma positiva al crecimiento de raíces en el tiempo, donde es mayor (121,90  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) con respecto a la labranza convencional (112,95  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), siendo más notorio en el estado de floración.

La estratificación de raíces es más homogénea en el perfil de suelo en labranza convencional que en cero labranza.

La rotación de cultivos, sólo provocó cambios en la Lv en el estado de floración, donde el uso de la rotación raps – trigo favorece el crecimiento de las raíces de trigo.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D. y Smith, M. 2006. FAO. Evapotranspiración del cultivo. Roma, Italia. ONU. *Estudio FAO de riego y drenaje*, capítulo 8. 161-182p.
- Ball, B.C.; Bingham, I.; Rees, R.M.; Watson, C.A. and Litterick, A. 2005. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. Can. J. *Soil Science*, 85: 557–577.
- Bengough, A.G.; McKenzie, B.M.; Hallett, P.D. and Valentine, T.A. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62 (1): 59–68.
- Benjamin, J. and Nielsen, D. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research*, 97: 248–253.
- Centro de información de recursos naturales, (CIREN), 1996, Estudio agrológico Región Metropolitana, Serie Santiago 425 p.
- Curry, J.P.; Byrne, D. and Schmidt, O. 2002. Intensive cultivation can drastically reduce earthworm populations in arable land. *Eurasian. J. Soil Biol.*, 38: 127–130.
- Dexter, A.R., Czyz, O.P. and Gate, 2004, Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research*, 79(2): 185-189.
- Di Rienzo, J; Casanoves, F y Macchiavelli, R. 2001. Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fabrizzi, K.P.; Rice, C.W.; Amado, T.J.C.; Fiorin, J.; Barbagelata, P. and Melchiori, R., 2009. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry*, 92: 129–143.
- Fageria, N., 2004. Influence of dry matter and length of roots on growth of five field crops at varying soil zinc and copper levels. J. *Plant Nutr.*, 27: 1517–1523.
- Glab T.; Ścigalska B. and Labuz B. 2013. Effect of crop rotations with triticale (× Triticosecale Wittm.) on soil pore characteristics. *Geoderma*, 202-203: 1-7
- Govaerts, B.; Mezzalama, M.; Sayre, K.D.; Crossa, J.; Nicol, J.M. and Deckers, J., 2006. Longterm consequences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/ wheat root rot and nematode populations in subtropical highlands. *Applied Soil Ecology*, 32: 305–315.

Guan, D.; Zhang, Y.; Al-Kaisi, M.; Wang, Q.; Zhang, M. and Li, Z. 2015. Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North chino Plain. *Soil and Tillage Research*, 146: 286–295.

Gregory, P.J., 2006. Plant Roots Growth Activity and Interaction with Soils. Blackwell, Oxford, UK: 1-329p

Gregory, P.J.2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science?. *Eurasian Soil Science*, 57: 2–12.

Grzesiak S.; Grzesiak M.; Hura T.; Marcin´ ska I. and Rzepka A. 2013. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany*, 88: 2-10

Hernanz, J.; López, R.; Navarrete, L. and Sánchez, V. 2002. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil and Tillage Research*, 66: 129 – 141.

Hou, W.; Li, R.; Jia, Z.; Han, Q.; Wang, W. and Yang, B. 2012. Effects of rotational tillage practices on soil properties, Winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north- west China. *Field Crops Research*, 129: 7 – 13.

Huang, G.; Chai, Q.; Feng, F. and Yu, A. 2012. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(8): 1286-1296

Hubert, F.; Hallaire, V.; Sardini, P.; Caner, L. and Heddadj, D .2007.Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma* 142: 226–236.

Ishaq, M.; Ibrahim, M.; Hassan, A.; Saeed M. and Lal, R. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil and Tillage Research*, 60: 153-161.

Jacobs, A.; Rauber, R. and Ludwing, B., 2009.Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two HaplicLuvisols after 40 years. *Soil and Tillage Research*, 102: 158–164.

Jones, D.L.; Hodge, A. and Kuzyakov, Y. 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytol.* 163: 459–480.

Kierkegaard, J.; Christen, O.; Krupinsky, J. and Layzell, D. 2008. Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Research*, 107: 185–195.

Kolb, E.; Hartmann, C. and Genet, P. 2012. Radial force development during root growth measured by photoelasticity. *PlantSoil*, 360: 19–35.

Lampurlanés, J.; Angás, P. and Cantero-Martínez, C. 2001. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Research*, 69: 27- 40.

Liu, L.; Gan, Y.; Bueckert, R. and Van Rees, K. 2011. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile. *Field Crops Research*, 122: 248 – 255.

Long, Y.; Palta, J.; Clements, J.; Buichell, B.; Siddique, K. and Rengel, Z. 2014. Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. *Field Crops Research*, 165: 61–70.

McKenzie, B.M.; Bengough, A.G.; Hallett, P.D.; Thomas, W.T.B.; Forster, B. and McNicol, J.W, 2009. Deep rooting and drought screening of cereal crops: a novel field based method and its application. *Field Crops Research*, 112: 165–171.

Martínez, E.: Valle, S.; Silva, P. y Acevedo, E. 2004. Efecto de la cero labranza en el crecimiento radical del trigo (*Triticum turgidum* L.) y propiedades físicas del suelo. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo Boletín*, (20): 151-162.

Martino, D. INIA Uruguay. 2002, [En-línea]. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. Disponible en el WWW: <http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/informe-28.pdf>. Citado: 24 de septiembre de 2013.

Martins, M.R.; Corá, J.E.; Jorge, R.F. and Marcelo, A.V. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 104: 22–29.

Melero, S.; Panettieri, M.; Madejón, E.; Gómez Macpherson H.; Moreno, F. and Murillo, J.M., 2011. Implementation of chiselling and mould board ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: effect on soil quality. *Soil and Tillage Research*, 112: 107–113

Miglierina, A.M.; Iglesias, J.O.; Landriscini, M.R.; Galantini, J.A. and Rosell, R.A., 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil and Tillage Research*, 53, 129–135.

Munkholm L.; Heck R. and Deen B. 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil & Tillage Research*, 127: 85–91

Muñoz, V.; Benítez, J.; López, L. and López, R. 2010. Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect. *European Journal of Agronomy*, 33: 182 – 187.

Newman, E. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3: 139-145.

Outoukarte, I.; Belaqziz, M.; Price, A.; Nsarellah, N. and El Hadrami. 2010. Durum wheat root distribution and agronomical performance as influenced by soil properties. *Agronomy Journal*, 50: 803-807.

Pearson, C.; Mann, I. and Zianhua, Z. 1991. Changes in root growth within successive wheat crops in a cropping cycle using minimum and conventional tillage. *Field Crops Research*, 28: 117-133.

Peigne, J.; Cannavaciolo, M.; Gautronneau, Y.; Aveline, A.; Giteau, J.L. and Cluzeau, D. 2009. Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 104: 207–214.

Qin, R.; Stamp, P. and Richner, W. 2004. Root development: Impact of tillage on root systems of Winter wheat. *Agronomy Journal*, 96: 1523-1530.

Santibáñez, F. y Uribe, J. 1990. Atlas Agroclimático de Chile. Regiones V y Metropolitana. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 65p

Santos, N.Z.; Dieckow, J.; Bayer, C.; Molin, R.; Favaretto, N.; Pauletti, V. and Piva, J.T. 2011. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, 111: 208–218.

Shaxson, F. y Barber, R. 2005. FAO. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Roma, Italia. ONU. *Boletín de suelo de la FAO*, capítulo 2,23p.

Soane, B.D.; Ball, B.C.; Arvidsson, J.; Basch, G.; Moreno, F. and Roger-Estrade, J. 2012. No-till in northern, western and southwestern Europe: a review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118: 66–87.

Tishchenko, S.A; Bezuglova, O.S and Morozov I.V. 2010. Specificity of the physical properties of soils in locally waterlogged landscapes in the lower reaches of the Don River. *Eurasian Soil Science*, 46 (3): 297–302.

Top G.y Ferré P., 2002. The soil solution Phase. Pp 417-545. In: Dane, J.H and topp, G.C.( Eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.

Toro, J. 1979, Determinación de la densidad radicular mediante el método de las intersecciones. Memoria Ing. Agr. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 84p.

Tracy, S.R.; Black, C.R.; Roberts, J.A. and Mooney, S.J. 2011. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *J. Sci. Food Agric.* 91 (9): 1528–1537.

Valle, S.2004, Efecto de la labranza cero en el crecimiento radical del trigo (*Triticum turgidum* L.), Memoria Ing. Agr. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. Santiago, Chile. 47p.

Vergara, W. 2016, Efecto de la rotación de cultivos y el sistema de labranza en las propiedades físicas del suelo y el rendimiento de trigo en un molisol del clima mediterráneo. Tesis magíster en Ciencias Agropecuarias mención Producción de Cultivos, Universidad de Chile, Facultad Agronómicas. Santiago, Chile. 58p.

White, R.G. and Kirkegaard, J.A. 2010. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil – implications for water uptake. *Plant Cell Environ*, 33: 133–148.

## ANEXO

### Anexo 1

#### Establecimiento de plantas en los sistemas de labranza y rotaciones.

<b>Análisis de la varianza</b>						
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV		
Establecimiento	16	0,96	0,9	14,7		

<b>Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)</b>						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	172265	9	19140,56	16,24	0,0015	
SL	146689	1	146689	265,82	<0,0001	(SL>rep)
ROT	11449	1	11449	9,71	0,0207	
SL>rep	3311	6	551,83	0,47	0,8111	
ROT*SL	10816	1	10816	9,18	0,0231	
Error	7073	6	1178,83			
Total	179338	15				

<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=25,1917</b>				
<i>Error: 551,8333 gl: 6</i>				
SL	Medias	n	E.E.	
LT	329,25	8	8,31	A
CL	137,75	8	8,31	B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)*

<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=36,8197</b>				
<i>Error: 1178,8333 gl: 6</i>				
ROT	Medias	n	E.E.	
7	260,25	8	12,14	A
8	206,75	8	12,14	B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)*

<b>Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=56,9432</b>					
<i>Error: 1178,8333 gl: 6</i>					
ROT	SL	Medias	n	E.E.	
7	LT	330	4	17,17	A
8	LT	328,5	4	17,17	A
7	CL	190,5	4	17,17	B
8	CL	85	4	17,17	C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)*

**Contenido de agua en el suelo en los sistemas de labranza y rotaciones**

<b>Análisis de la varianza</b>				
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
ha	36	0,98	0,93	21,47

<b>Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)</b>						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	600,76	23	26,12	21,47	<0,0001	
ESTADO-SL	588,45	5	117,69	151,78	<0,0001	(ESTADO-SL>Rep)
ROT	2,56	1	2,56	2,10	0,1725	
ESTADO-SL>Rep	9,3	12	0,78	0,64	0,7766	
ROT*ESTADO-SL	0,45	5	0,09	0,07	0,9952	
Error	14,60	12	1,22			
Total	615,36	35				

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,0964**

*Error: 0,7754 gl: 12*

ESTADO-SL	Medias	n	E.E.	
DH-NT	11,71	6	0,36	A
DH-CT	8,6	6	0,36	B
FL-NT	5,22	6	0,36	C
FL-CT	4,16	6	0,36	C
MF-NT	0,71	6	0,36	D
MF-CT	0,42	6	0,36	D

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,7471**

*Error: 1,2164 gl: 12*

ROT	Medias	n	E.E.	
8	5,4	18	0,26	A
7	4,87	18	0,6	A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,009**

*Error:1,2164 gl: 12*

ROT	ESTADO-SL	Medias	n	E.E.	
8,00	DH-NT	11,94	3	0,64	A
7,00	DH-NT	11,48	3	0,64	A
8,00	DH-CT	8,92	3	0,64	B
7,00	DH-CT	8,28	3	0,64	B
8,00	FL-NT	5,69	3	0,64	C
7,00	FL-NT	4,76	3	0,64	C
8,00	FL-CT	4,46	3	0,64	C
7,00	FL-CT	3,86	3	0,64	C
8,00	MF-NT	0,85	3	0,64	D
7,00	MF-NT	0,56	3	0,64	D
8,00	MF-CT	0,56	3	0,64	D
7,00	MF-CT	0,28	3	0,64	D

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

## Anexo 2

**Densidad de raíces ( $L_v$ ) en el estado de dos hojas a distintas profundidades, según sistema de labranza y rotación.**

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
$L_v$ (cm/cm <sup>3</sup> )	80	0,7	0,2	96,11

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	142,73	49	2,91	1,4	0,1632	
slprof	102,31	9	11,37	12,7	<0,0001	(slprof>rep)
rot	6,11	1	6,11	2,94	0,0968	
slprof>rep	26,85	30	0,9	0,43	0,9879	
slprof*rot	7,46	9	0,83	0,4	0,9258	
Error	62,33	30	2,08			
Total	205,06	79				

---

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,9894**

*Error: 0,8951 gl: 30*

---

<b>slprof</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
CL2	3,64	8	0,33	A
CL1	3,43	8	0,33	A
LT2	2,24	8	0,33	B
LT3	1,16	8	0,33	C
CL3	1,11	8	0,33	C
LT1	1,1	8	0,33	C
LT4	0,83	8	0,33	C
CL4	0,6	8	0,33	C
CL5	0,47	8	0,33	C
LT5	0,42	8	0,33	C

---

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

---

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,6417**

*Error: 2,0778 gl: 30*

---

<b>ROT</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
7	1,78	40	0,23	A
8	1,22	40	0,23	A

---

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

---

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,2148**

*Error: 2,0778gl: 30*

---

<b>slprof</b>	<b>rot</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
CL2	7	4,26	4	0,72	A
CL1	7	4,07	4	0,72	A
CL2	8	3,03	4	0,72	A
LT2	7	2,95	4	0,72	A
CL1	8	2,79	4	0,72	A
LT2	8	1,54	4	0,72	B
CL3	7	1,46	4	0,72	B
LT3	8	1,35	4	0,72	B
LT1	8	1,27	4	0,72	B
LT4	7	1,10	4	0,72	B
LT3	7	0,96	4	0,72	B
LT1	7	0,94	4	0,72	B
CL4	7	0,91	4	0,72	B
CL3	8	0,76	4	0,72	B
CL5	7	0,70	4	0,72	B
LT4	8	0,56	4	0,72	B
LT5	8	0,43	4	0,72	B

---

LT5	7	0,42	4	0,72	B
CL4	8	0,28	4	0,72	B
CL5	8	0,24	4	0,72	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Densidad de raíces (Lv) en el estado de floración a distintas profundidades, según sistema de labranza y rotación.**

Análisis de la varianza				
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Lv(cm/cm <sup>3</sup> )	80	0,95	0,88	27,47

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	660,44	49	13,48	12,93	<0,0001	
slprof	553,48	9	61,5	23,16	<0,0001	(slprof>rep)
rot	11,06	1	11,06	10,62	0,0028	
slprof>rep	79,66	30	2,66	2,55	0,0063	
slprof*rot	16,24	9	1,8	1,73	0,125	
Error	31,26	30	1,04			
Total	691,71	79				

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,5685**

Error: 1,0421gl: 30

slprof	rot	Medias	n	E.E.	
CL1	7	9,27	4	0,51	A
CL2	7	7,89	4	0,51	B
CL1	8	7,77	4	0,51	B
LT1	8	7,03	4	0,51	B
CL2	8	5,85	4	0,51	C
LT2	7	5,8	4	0,51	C
LT1	7	5,61	4	0,51	C
LT2	8	4,91	4	0,51	C
LT4	7	3,06	4	0,51	D
LT3	7	2,78	4	0,51	D
LT3	8	2,46	4	0,51	D
CL3	7	2,14	4	0,51	D
CL4	7	1,55	4	0,51	D
LT4	8	1,46	4	0,51	D
CL5	7	1,43	4	0,51	D

LT5	7	1,38	4	0,51	D
CL3	8	1,27	4	0,51	D
LT5	8	1,07	4	0,51	D
CL5	8	0,85	4	0,51	D
CL4	8	0,79	4	0,51	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,7042

Error: 2,6553 gl: 30

slprof	Medias	n	E.E.	
CL1	8,52	8	0,58	A
CL2	6,87	8	0,58	B
LT1	6,32	8	0,58	B
LT2	5,35	8	0,58	B
LT3	2,62	8	0,58	C
LT4	2,26	8	0,58	C
CL3	1,7	8	0,58	C
LT5	1,22	8	0,58	C
CL4	1,17	8	0,58	C
CL5	1,14	8	0,58	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,4544

Error: 1,0421 gl: 30

ROT	Medias	n	E.E.	
7	4,09	40	0,16	A
8	3,34	40	0,16	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Densidad de raíces ( $L_v$ ) en el estado de madurez fisiológica a distintas profundidades, según sistema de labranza y rotación.**

#### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
$L_v(\text{cm}/\text{cm}^3)$	80	0,84	0,58	52,22

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	253,93	49	5,18	3,26	0,0005	
slprof	201,57	9	22,4	17,46	<0,0001	(slprof>rep)
rot	0,46	1	0,46	0,29	0,5937	
slprof>rep	38,48	30	1,28	0,81	0,7194	
slprof*rot	13,41	9	1,49	0,94	0,5078	
Error	47,67	30	1,59			
Total	301,6	79				

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,9369**

Error: 1,5890gl: 30

<b>siprof</b>	<b>rot</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
CL2	7	6,28	4	0,63	A
CL1	8	5,45	4	0,63	A
CL2	8	4,28	4	0,63	B
CL1	7	4,27	4	0,63	B
LT2	8	4,05	4	0,63	B
LT2	7	3,40	4	0,63	B
LT1	8	3,20	4	0,63	B
LT1	7	2,71	4	0,63	B
LT4	7	1,78	4	0,63	C
LT3	7	1,70	4	0,63	C
LT4	8	1,39	4	0,63	C
LT3	8	1,38	4	0,63	C
CL3	8	1,38	4	0,63	C
LT5	7	1,3	4	0,63	C
CL3	7	1,19	4	0,63	C
CL4	7	1,17	4	0,63	C
CL5	7	1,11	4	0,63	C
CL4	8	0,89	4	0,63	C
LT5	8	0,71	4	0,63	C
CL5	8	0,66	4	0,63	C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=1,1845**

Error: 1,2828 gl: 30

<b>siprof</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
CL2	5,28	8	0,4	A
CL1	4,86	8	0,4	A
LT2	3,73	8	0,4	B
LT1	2,96	8	0,4	B
LT4	1,58	8	0,4	C
LT3	1,54	8	0,4	C
CL3	1,28	8	0,4	C
CL4	1,03	8	0,4	C
LT5	1,01	8	0,4	C
CL5	0,88	8	0,4	C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,5612**

*Error: 1,5890 gl: 30*

ROT	Medias	n	E.E.
7	2,49	40	0,2 A
8	2,34	40	0,2 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

### Anexo 3

**Densidad de raíces para cada sistema de labranza y rotación, según estado de desarrollo.**

Análisis de la varianza				
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Lv(cm/cm <sup>2</sup> )	48	0,97	0,92	9,52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	37285,73	29	1285,71	20,21	<0,0001	
SL-ESTADO	35708,33	5	7141,67	101,76	<0,0001	(SL-ESTADO>rep)
rot	126,82	1	126,82	1,99	0,175	
SL-ESTADO>rep	1263,3	18	70,18	1,1	0,4185	
rot*SL-ESTADO	187,28	5	37,46	0,59	0,7085	
Error	1144,93	18	63,61			
Total	38430,66	47				

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=8,8621**

*Error: 70,1836 gl: 18*

SL-ESTADO	Medias	n	E.E.
CL-FL	121,9	8	2,96 A
LT-FL	112,95	8	2,96 B
CL-MF	86,56	8	2,96 C
LT-MF	78,1	8	2,96 C
CL-DH	55,96	8	2,96 D
LT-DH	47,1	8	2,96 D

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

**Test:DGC Alfa=0,05**

**PCALT=4,6343**

*Error: 63,6074 gl: 18*

ROT	Medias	n	E.E.
7	85,39	24	1,63 A
8	82,14	24	1,63 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=12,2183**

*Error: 63,6074 gl: 18*

ROT	SL-ESTADO	Medias	n	E.E.	
7	CL-FL	126,47	4	3,99	A
8	CL-FL	117,34	4	3,99	A
8	LT-FL	113,04	4	3,99	A
7	LT-FL	112,86	4	3,99	A
7	CL-MF	88,38	4	3,99	B
8	CL-MF	84,73	4	3,99	B
8	LT-MF	79,56	4	3,99	B
7	LT-MF	76,64	4	3,99	B
7	CL-DH	59,09	4	3,99	C
8	CL-DH	52,84	4	3,99	C
7	LT-DH	48,89	4	3,99	C
8	LT-DH	45,31	4	3,99	C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

#### Anexo 4

#### Estratificación de la densidad de raíces en el perfil

##### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
LV <sub>(0,5)</sub> / LV <sub>(5-55)</sub>	48	0,88	0,68	33,52

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	244,45	29	8,43	4,38	0,0009	
EST-SL	107,83	5	21,57	3,45	0,0231	(EST-SL>rep)
rot	11,97	1	11,97	6,22	0,0226	
EST-SL>rep	112,43	18	6,25	3,24	0,0083	
ROT*EST-SL	12,22	5	2,44	1,27	0,3194	
Error	34,65	18	1,92			
Total	279,1	47				

---

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,6437**

*Error: 6,2460 gl: 18*

---

<b>EST-SL</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
FL-CL	6,13	8	0,88	A
DH-CL	5,84	8	0,88	A
MF-CL	4,66	8	0,88	A
FL-LT	3,13	8	0,88	B
MF-LT	2,84	8	0,88	B
DH-LT	2,23	8	0,88	B

---

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

---

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,8062**

*Error: 1,9249 gl: 18*

---

<b>rot</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
8	4,64	24	0,28	A
7	3,64	24	0,28	B

---

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

---

**Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=2,1255**

*Error: 1,9249 gl: 18*

---

<b>rot</b>	<b>EST-SL</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
8	FL-CL	7,24	4	0,69	A
8	DH-CL	6,49	4	0,69	A
7	DH-CL	5,2	4	0,69	B
7	FL-CL	5,03	4	0,69	B
8	MF-CL	4,71	4	0,69	B
7	MF-CL	4,61	4	0,69	B
8	FL-LT	3,86	4	0,69	B
8	MF-LT	3,69	4	0,69	B
7	DH-LT	2,61	4	0,69	C
7	FL-LT	2,41	4	0,69	C
7	MF-LT	1,99	4	0,69	C
8	DH-LT	1,85	4	0,69	C

---

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )*

## Anexo 5

### **Correlación entre contenido de agua y densidad de raíces, según cada estado**

#### **Dos hojas**

---

*Estado = Dos hojas(DH)*

*Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades*

---

	Contenido de agua (cm)	Lv (cm · cm <sup>-3</sup> )
Contenido de agua(cm)	1	0,74
Lv (cm · cm <sup>-3</sup> )	0,11	1

---

Correlación entre contenido de agua (Ha) y densidad radical (Lv) para el estado de dos hojas, el contenido de agua esta medido en altura de agua (cm) y la densidad de raíces en cm · cm<sup>-3</sup>.

#### **Floración**

---

*Estado = Floración(FL)*

*Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades*

---

	Contenido de agua (cm)	Lv (cm · cm <sup>-3</sup> )
Contenido de agua(cm)	1	0,05
Lv (cm · cm <sup>-3</sup> )	-0,58	1

---

Correlación entre contenido de agua (Ha) y densidad radical (Lv) para el estado de Floración, el contenido de agua esta medido en altura de agua (cm) y la densidad de raíces en cm · cm<sup>-3</sup>.

#### **Madurez Fisiológica**

---

*Estado = Madurez Fisiológica(MF)*

*Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades*

---

	Contenido de agua (cm)	Lv (cm · cm <sup>-3</sup> )
Contenido de agua(cm)	1	4,5E-04
Lv (cm · cm <sup>-3</sup> )	-0,85	1

---

Correlación entre contenido de agua (Ha) y densidad radical (Lv) para el estado de madurez fisiológica, el contenido de agua esta medido en altura de agua (cm) y la densidad de raíces en cm · cm<sup>-3</sup>.

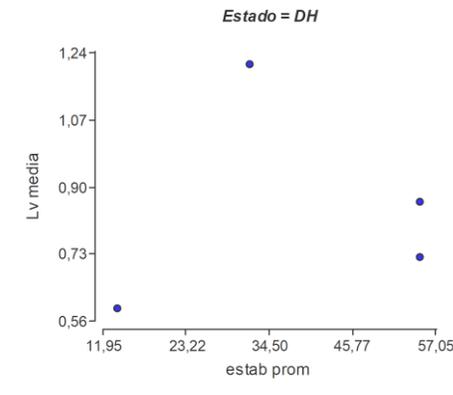
## Correlación entre densidad radical (Lv) y establecimiento de plantas para cada estado de desarrollo

### Dos hojas

*Estado = Dos hojas(DH)*

*Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades*

	Establecimiento(plantas $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	Lv (cm $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )
Establecimiento(plantas $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	1	0,87
Lv (cm $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )	0,13	1



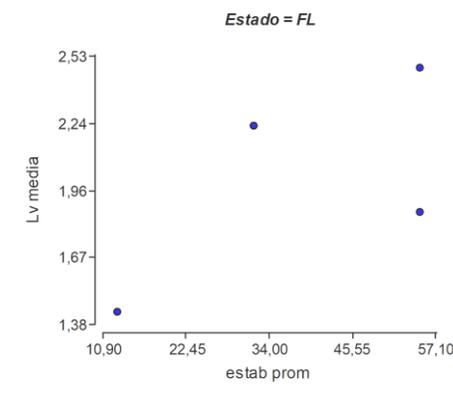
Correlación entre establecimiento de plantas (estab prom) y densidad de raíces (Lv) para el estado de dos hojas, el establecimiento de plantas esta medido en plantas  $\cdot$  m<sup>-2</sup> y la densidad de raíces en cm  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>.

### Floración

*Estado = Floración(FL)*

*Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades*

	Establecimiento(plantas $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	Lv (cm $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )
Establecimiento(plantas $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	1	0,33
Lv (cm $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )	0,67	1



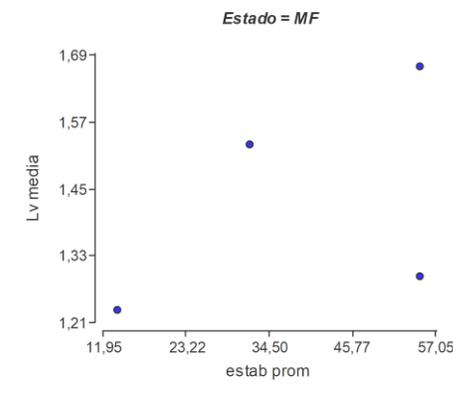
Correlación entre establecimiento de plantas (estab prom) y densidad de raíces (Lv) para el estado de Floración, el establecimiento de plantas esta medido en plantas  $\cdot$  m<sup>-2</sup> y la densidad de raíces en cm  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>.

### Madurez fisiológica

Estado = Madurez Fisiológica(MF)

Correlación de Pearson: Coeficientes/probabilidades

	Establecimiento(plantas $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	Lv (cm $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )
Establecimiento(plantas $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	1	0,52
Lv (cm $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )	0,48	1



Correlación entre establecimiento de plantas (estab prom) y densidad de raíces (Lv) para el estado de madurez fisiológica, el establecimiento de plantas esta medido en plantas  $\cdot$  m<sup>-2</sup> y la densidad de raíces en cm  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>.