



# UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

## GESTIÓN DE RIEGO BASADA EN SONDAS DE CAPACITANCIA PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN EN NARANJOS (*Citrus sinensis* L.).

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de  
Magíster en Manejo de suelos y aguas.

**CATALINA JAVIERA ORQUERA CRUZ**

Director de Tesis/AFE  
Cristian Kremer Fariña

Profesores consejeros  
Julio Haberland Arellano  
Marco Garrido Salinas

SANTIAGO - CHILE  
2022

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

**GESTIÓN DE RIEGO BASADA EN SONDAS DE CAPACITANCIA PARA MAXIMIZAR LA  
PRODUCCIÓN EN NARANJOS (*Citrus sinensis* L.).**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Manejo de suelos y aguas.

**CATALINA JAVIERA ORQUERA CRUZ**

Calificaciones	Calificaciones
(Memoria de Título)	(Tesis de Grado)

**DIRECTOR DE TESIS/AFE**

Cristian Kremer Fariña

Ingeniero Agrónomo, Ph.D. en Ciencias de la Ingeniería

**PROFESORES CONSEJEROS**

Julio Haberland Arellano

Ingeniero Agrónomo, Ph.D. en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Marco Garrido Salinas

Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.

Santiago, Chile  
2022

**GESTIÓN DE RIEGO BASADA EN SONDAS DE CAPACITANCIA PARA MAXIMIZAR  
LA PRODUCCIÓN EN NARANJOS (*Citrus sinensis* L.).**

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Quisiera expresar mi más sincera gratitud a mi papá y mamá, por acompañarme, contenerme y motivarme durante este largo y laborioso proceso. A mi papá por entregarme la metodología y su tiempo, al estar a mi disposición para cada medición que tuve que realizar; a mi mamá por darme su fuerza y ternura en cada momento de felicidad y en cada caída.

Agradecer a mi profesor guía, Cristian Kremer, por su apoyo a la distancia y también presencial, por brindarme la oportunidad de trabajar con él, entregarme los conocimientos necesarios para culminar este proceso y tener paciencia en mi aprendizaje. También agradecer al profesor Oscar Seguel, por entregarme su apoyo y su tiempo para cualquier duda que pude tener. Gracias a Víctor, por guiarme al inicio del proyecto, por su tiempo y sus conocimientos transmitidos.

A mi hermano y hermana, José Miguel y Clara, por ayudarme, escucharme y contenerme. Por leer mi tesis a pesar de no entender sobre el tema y por brindarme risas y abrazos en los momentos difíciles. A mis tíos Pancho y Juan, que me entregan su cariño y preocupación constantemente.

A Javier, Lucía, Benjamín, Noemí, Alonso, Salvador, Miguel, Cristian, Joaquín, Catalina, Daniel, Mica, Omayra, Alondra, Fernando, Eduardo, Emilia y Antonio, por aconsejarme desde la posición de colegas y principalmente amigos. Por escucharme y ayudarme en las distintas etapas de mi tesis.

Por último, quiero agradecer y dedicar este trabajo a mi Sarita, que a pesar de no estar presente físicamente, la siento en cada segundo de mi vida y en cada paso que doy. Todo es por ti y para ti.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	1
<b>ABSTRACT</b>	2
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>HIPOTESIS</b>	6
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	6
<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	6
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	6
Zona de estudio	6
Clima	7
Suelo	7
Metodología	7
Caracterización del suelo	8
Contenido de agua del suelo	8
Balance hídrico	8
Variables fisiológicas	11
Crecimiento	11
Crecimiento de fruto	12
Producción	12
Análisis estadístico	13
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	14
Caracterización de suelo	14
Determinación de la línea de gestión	16
Balance hídrico del suelo	18
Contenido de agua del suelo	20
Variables fisiológicas	22
Crecimiento de fruto	24
Producción	26
Variables de calidad	28
Línea base del cultivo	33
<b>CONCLUSIONES</b>	36
<b>LITERATURA CITADA</b>	37

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1:</b> Coeficiente de cultivo para cítricos	11
<b>Cuadro 2:</b> Diámetros comerciales para cada calibre de naranjas	12
<b>Cuadro 3:</b> Resumen de fórmulas utilizadas para evaluar la producción	12
<b>Cuadro 4:</b> Características físicas del perfil de suelo	14
<b>Cuadro 5:</b> Distribución de poros por estrata	14
<b>Cuadro 6:</b> Variación del contenido de agua según la línea de gestión establecida	18
<b>Cuadro 7:</b> Cantidad de agua de entradas y salidas, para balances hídricos	19
<b>Cuadro 8:</b> Diferencias estadísticas estimadas en potencial xilemático	22
<b>Cuadro 9:</b> Significancia estadística de producción 1° temporada	26
<b>Cuadro 10:</b> Significancia estadística de producción 2° temporada	27
<b>Cuadro 11:</b> Significancia estadística de producción 3° temporada	28
<b>Cuadro 12:</b> Significancia estadística de calidad 1° temporada	28
<b>Cuadro 13:</b> Significancia estadística de calidad 2° temporada	29
<b>Cuadro 14:</b> Significancia estadística de calidad 3° temporada	30
<b>Cuadro 15:</b> Análisis estadístico de pendientes e interceptos por tratamiento	34
<b>Cuadro 16:</b> Resumen de mejores tratamientos productivos (Línea base)	34
<b>Cuadro 17:</b> Análisis estadístico de pendientes e interceptos de mejores tratamientos	35
<b>Cuadro 18:</b> Planilla de línea base para cultivo de naranjo “Lane Late”	36

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Tratamientos de riego	7
<b>Figura 2:</b> Gráfico de sumatoria y de apilado generados mediante IrriMAX	9
<b>Figura 3a:</b> Profundidad medida por cada sensor en la zona radicular	10
<b>Figura 3b:</b> Imagen de proyección de copa en el suelo	10
<b>Figura 4:</b> Distribución de raíces en perfil de calicata del sector	15
<b>Figura 5:</b> Curva característica de suelos por horizontes	15
<b>Figura 6:</b> Gráfico de apilado y de sumatoria para determinación del nivel de lleno	16
<b>Figura 7:</b> Gráfico de sumatoria generado mediante software IrriMAX	17
<b>Figura 8:</b> Determinación de la línea de gestión	18
<b>Figura 9:</b> Gráfico balance hídrico de las tres temporadas evaluadas	19
<b>Figura 10:</b> Contenido volumétrico de agua y potencial xilemático	21
<b>Figura 11a:</b> Curva crecimiento de fruto 1º temporada	25
<b>Figura 11b:</b> Curva crecimiento de fruto 2º temporada	25
<b>Figura 12a:</b> Distribución de calibres comerciales, temporada 1	31
<b>Figura 12b:</b> Distribución de calibres comerciales, temporada 2	31
<b>Figura 12c:</b> Distribución de calibres comerciales, temporada 3	32
<b>Figura 13:</b> Línea base para cada tratamiento	33
<b>Figura 14:</b> Líneas bases de mejores tratamientos	34
<b>Figura 15:</b> Línea base para cultivo de naranjo, sin limitaciones hídricas	35

## RESUMEN

Debido a las repercusiones que ha generado el cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos para la producción agrícola, es que se está considerando cada vez más la combinación entre una gestión mejorada de los planes de riego y las inversiones en tecnología, para hacer un uso más eficiente del agua. Para esto, se realizó un experimento en la Comuna de Peumo, Región de O'Higgins, en naranjos var. Lane Late, enfocado a optimizar la programación de riego utilizando líneas de gestión. Estas últimas se determinan a partir de la interpretación de curvas de extracción de agua del suelo, mediante el uso de sondas de capacitancia. Para su validación se contrastó su uso con mediciones del estado hídrico de la planta. El ensayo propuso cinco tratamientos en bloque con cuatro repeticiones, en donde T1 correspondió al riego campo (testigo) en donde la frecuencia y tiempo de riego fue determinado por su línea de gestión; T2, se aplicó un 20% menos de agua y T3, un 30% más de agua, ambos manteniendo la misma frecuencia y tiempo de riego determinado por la línea de gestión de T1; T4, riego según la línea de gestión definida hasta fin de caída post cuaja y luego un 20% menos de riego y T5, riego según la línea de gestión hasta fin de caída post cuaja y después un 40% menos de riego hasta cosecha. Cada tratamiento fue monitoreado con mediciones de potencial xilemático y de demanda atmosférica. El ensayo evidenció una tendencia a mejores resultados productivos, mejor tamaño de fruto, mejores porcentajes de sólidos solubles y calibre comercial en tratamientos con menor cantidad de agua según lo estimado a partir de la línea de gestión (T2 y T5), sin presentar valores de estrés en las mediciones de potencial xilemático. T3 presentó los valores más bajos en los parámetros productivos y de calidad, confirmando que un sobre riego no mejora estas variables. Finalmente, la programación de riego mediante líneas de gestión podría optimizar la producción si es monitoreada con mediciones del estado hídrico de la planta, permitiéndose restringir más el punto de recarga.

**Palabras claves:** Sonda de capacitancia, Potencial xilemático, *Citrus sinensis L.*, Déficit de presión de vapor.



## ABSTRACT

Due to the repercussions that climate change generates in the availability of water resources for agricultural production, the combination between an improved management of irrigation plans and investments in technology is being increasingly considered, to make more efficient use of water. For this, an experiment was carried out in the Peumo Commune, O'Higgins Region, in orange trees var. Lane Late, focused on optimizing irrigation scheduling using management lines. The latter are determined from the interpretation of water extraction curves from the soil, through the use of capacitance probes. For its validation, its use was contrasted with measurements of the water status of the plant. The trial proposed five block treatments with four repetitions, where T1 corresponded to field irrigation (control) where the frequency and time of irrigation was determined by its management line; T2, 20% less water was applied and T3, 30% more water, both maintaining the same irrigation frequency and time determined by the management line of T1; T4, irrigation according to the defined management line until the end of post fruit set fall and then 20% less irrigation and T5, irrigation according to the management line until the end of post fruit set fall and then 40% less irrigation until harvest. Each treatment was monitored with measurements of xylem potential and atmospheric demand. The trial showed an inclination towards better production results, better fruit size, better percentages of soluble solids and commercial caliber in treatments with less water as estimated from the management line (T2 and T5), without presenting values of stress in xylem potential measurements. T3 presented the lowest values in the productive and quality parameters, confirming that over-irrigation does not improve these variables. Finally, irrigation scheduling through management lines could optimize production if it is monitored with measurements of the water status of the plant, allowing the recharge point to be further restricted.

**Keywords:** capacitance probes, xylem potential, *Citrus sinensis L.*, vapor pressure deficit.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de un contexto de cambio climático, en la actualidad se han evidenciado notables efectos en el ciclo hidrológico, como la escasez de agua, cambios en la intensidad de la precipitación y variabilidad de eventos extremos (García González et al., 2011), los cuales tendrán importantes repercusiones en la disponibilidad de los recursos hídricos del mundo (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). Sus efectos en Chile se han notado, entre otros, en un aumento en la evapotranspiración anual potencial, lo que se traduce en un aumento del requerimiento hídrico de los cultivos que va desde el 5 al 8% por cada grado de aumento en la temperatura. Esto podría significar una demanda adicional de agua de hasta 800 m<sup>3</sup> por hectárea (Santibáñez et al., 2016).

El agua es el principal recurso en la producción agrícola y de gran importancia en cultivos permanentes, ya que frente a una escasez los agricultores enfrentan riesgos debido a la inversión monetaria inicial, arriesgando pérdidas no solo en la producción actual, sino también futura (Hadjigeorgalis, 2004). La intensidad de un estrés hídrico y el momento fenológico en que se encuentra la planta determinan la reducción del rendimiento; para el caso de cítricos las etapas más sensibles son la floración, fructificación y desarrollo de la fruta (Ginestar y Castel, 1996). En Chile, la Región del Libertador Bernardo O'Higgins posee alrededor de 1758,2 ha de naranjos. En la comuna de Peumo el naranjo, con 665,1 ha, es el frutal con mayor superficie plantada después del palto (CIREN, 2018). En esta comuna la precipitación media anual es de 609 mm, sin embargo, por efectos de cambio climático, se pronostica hacia el año 2050 un baja en ésta, llegando a los 513 mm (Santibáñez, 2016) afectando así la disponibilidad de agua de riego en la zona.

La presión por el recurso requiere cambios estructurales entre ellos en la agricultura de riego especialmente en su programación, de manera de proveer suministros de agua acorde con las necesidades hídricas de las plantas (Medrano et al., 2007). La tecnificación del riego, complementado con nuevas metodologías y tecnologías de soporte a la programación, ayudarían a una producción más eficiente y resiliente (Comisión Nacional de Riego, 2002).

Una de las estrategias de programación utilizadas para mejorar la eficiencia del uso del agua corresponde al uso de sondas que monitorean el contenido de agua en el suelo como lo son las FDR (Frequency Domain Reflectometry), las cuales estiman el contenido de agua en el suelo mediante la respuesta a cambios en su constante dieléctrica, usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias conocida como capacitancia (Sentek Pty, 2018). De esta manera, estas permiten un registro discreto (Diviner 2000, Sentek) o continuo (Enviroscan, Sentek) del contenido de agua en el suelo (García et al., 2005). Mounzer et al. (2008) realizó un estudio de programación de riego en *Prunus pérsica* L. en donde comparó dos metodologías: la primera consistía en regar satisfaciendo los requerimientos hídricos del cultivo según la ecuación de FAO y Penman-Monteith; en la segunda, la frecuencia y la cantidad de riego estaban determinados según lo que indica la sonda de capacitancia FDR. A partir de esto, se concluyó que el sistema regado a partir del monitoreo con sondas de capacitancia ahorra un 18% de agua de riego en comparación al método convencional, sin que esto afectara el rendimiento ni el crecimiento vegetativo de los árboles (Mounzer et al., 2008).

A partir de los datos generados por la sonda de medición continua (Enviroscan, Sentek), es posible generar umbrales para la programación del riego (Husseini-Mounzer et al., 2008).

Callejas et al. (2013), denomina estos umbrales como Línea de Gestión, y están basados en la dinámica de extracción de agua desde el suelo por la planta y la demanda atmosférica, expresada esta última como la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). A través de la plataforma Dropcontrol, que integra la tecnología de medición de contenido de agua del suelo de la sonda Envirosca junto con variables climáticas, es que estos datos son transmitidos mediante un sistema de telemetría al software IrriMAX. El programa computacional IrriMAX permite observar e interpretar la información obtenida por la sonda a través de gráficos que muestran la variación del contenido de agua del suelo a diferentes profundidades de la zona de raíces, observándose el movimiento del agua y el consumo de la planta bajo condiciones cambiantes, de suelo, de la planta (estados fenológicos) y del clima. Para definir la línea de gestión se trabaja con dos gráficos: de apilado y de sumatoria. El gráfico de sumatoria presenta la suma de los primeros tres sensores, entregando la variación del contenido de agua en el suelo en su conjunto, permitiendo así, definir la frecuencia de riego. El gráfico de apilado entrega esta misma variación, pero para cada sensor de la sonda por separado; al observar cada sensor por separado, se puede determinar la zona de mayor actividad radical, y al observar el último sensor se puede determinar el tiempo de riego.

A partir de estos gráficos, se genera una interpretación donde se establecen líneas de referencia que conforman las líneas de gestión: Nivel de lleno, Capacidad de campo sonda y Punto de recarga. Cada una de éstas se define de la siguiente manera (Callejas et al. 2013):

- Nivel de lleno: corresponde a la máxima cantidad de agua que puede contener el suelo sin que haya percolación profunda. Se determina a través del gráfico de apilado, observando que a este nivel de aporte de agua, el sensor más profundo no muestre, o muestre muy baja actividad (aumento en la curva del último sensor).
- Capacidad de campo: es la cantidad de agua que se retiene en un suelo después de ser saturado (Singer y Munns, 1999 citado en Tamara y Ducuara, 2016), es decir, cuando el agua libre o gravitacional deja de existir en el suelo. La determinación de esta línea de gestión se realiza en invierno, sin transpiración y una mínima evaporación, directamente con los datos de contenido de agua del suelo registrados por la sonda después de una lluvia abundante o un riego profuso. Cuando la curva del gráfico de sumatoria se comienza a estabilizar (aproximadamente 3 días después de la lluvia) se establece la línea horizontal que determina la capacidad de campo del sistema.
- Punto de recarga: momento en el que hay que volver a regar. Para definir el momento de riego es requerido definir dos conceptos previamente: “Punto de marchitez permanente (PMP)” y “humedad aprovechable para la planta”. El primero se entiende como el momento en que el agua del suelo se encuentra fuertemente retenida, al nivel de que la planta no es capaz de acceder a ella (van Veenhuizen, 2000); el segundo corresponde a la cantidad de agua que se encuentra entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), es decir, el agua que se encuentra en el suelo y que la planta es capaz de absorber. Por lo tanto, es dentro de este rango de agua en donde hay que establecer el momento de riego procurando no afectar el rendimiento ni las funciones metabólicas de la planta (Zotarelli et al., 2013). Gurovich (2001) (citado por Callejas et al., 2013) complementa el concepto de humedad aprovechable señalando que el agua disponible para las plantas también depende de la capacidad de las raíces para absorberla, además de la habilidad del suelo para retenerla y transmitirla a una velocidad suficiente para compensar las pérdidas por transpiración, por lo que al momento de establecer el punto de recarga es importante evaluar la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmosfera. La determinación del punto de recarga se realiza en verano con días despejados y un período donde la demanda

atmosférica ( $ET_0$ ) sea más o menos constante. Para su definición se utiliza el gráfico de sumatoria, en el cual se entienden las caídas diarias como una reducción del contenido de agua en el suelo debido al consumo de la planta. Así, esta línea de gestión se establece visualmente, cuando en el gráfico de sumatoria se evidencia una caída en la tasa diaria de consumo de un 20% con respecto al día anterior, a una máxima y constante demanda atmosférica (Thompson et al., 2007). Esto da a entender que a la planta tiene mayor dificultad en obtener el agua desde el suelo para suplir la demanda atmosférica, por lo que el momento de riego debe darse el día anterior a ese cambio en la tasa.

Si bien, la programación de riego mediante el uso de sondas de capacitancia resulta ser una estrategia efectiva, al ser una metodología que se basa principalmente en la interpretación visual del comportamiento del agua en el suelo, podría resultar no ser tan precisa. El punto de recarga asume que la disminución de la tasa de absorción de agua por la planta sería el comienzo de un estrés hídrico, sin embargo no se contrasta con mediciones objetivas en la planta que certifique el inicio de esta condición.

Garnier y Berger (1985) (citado en Shackel, 2007) determinaron que el potencial hídrico se relaciona fuertemente con el riego y con la actividad fisiológica de la planta, y establecen tres posibles mediciones de éste: potencial hídrico pre alba, potencial hídrico xilemático del mediodía y potencial hídrico foliar del mediodía. Debido a que el potencial hídrico varía a lo largo del día, se establecen dos momentos oportunos de medición (pre alba y mediodía) en los cuales el potencial se mantiene estable alrededor de dos horas (Naor, 2000). De estas tres opciones, el potencial xilemático ( $\psi_x$ ) del mediodía resulta ser el más sensible a cambios en las prácticas de riego y el que se relaciona más estrechamente a procesos fisiológicos de los cultivos (Naor, 2006, Ferreyra et al. 2001). Por ejemplo, el estudio de Ballester et al. (2013) realizado en naranjos var. Navel Lane Late, con tratamientos en donde se aplicaron porcentajes de la evapotranspiración del cultivo en etapas de baja sensibilidad al estrés hídrico, junto con un monitoreo del estado hídrico de la planta basado en mediciones del  $\psi_x$  de mediodía, concluye que se pueden ahorrar hasta un 19% de agua de riego sin reducción en el rendimiento, manteniendo un umbral de potencial de -1.5 MPa. El  $\psi_x$  representa la tensión con que se encuentra el agua en el xilema y se mide en unidades de presión expresadas en términos negativos, ya que el agua en el xilema se encuentra a presiones inferiores que la atmosférica (Sellés y Ferreyra, 2006).

Es necesario que las mediciones del estado hídrico de la planta, como el potencial xilemático ( $\psi_x$ ) vayan acompañadas de datos de la condición atmosférica, esto debido a que el agua se mueve en el sistema suelo-planta-atmósfera gracias a un gradiente de potencial, el cual va de mayor potencial (suelo húmedo) a menor (atmósfera) (Silva et al., 2015). Bajo una condición de agua no limitante en el suelo, el aumento del déficit de presión de vapor (DPV), genera una mayor demanda atmosférica, que en consecuencia genera un aumento en la transpiración del cultivo y, por lo tanto, una disminución del  $\psi_x$  hasta un determinado valor que depende de cada especie (Lorenzo y Sánchez-Guerrero, 2008). A esta relación se le denomina Línea base o Línea de referencia e indica el  $\psi_x$  límite (sin estrés hídrico) al que debería estar el cultivo según las condiciones atmosféricas del lugar (McCutchan y Shackel, 1992). Existen diferentes autores que han definido líneas bases para diferentes cultivos tales como almendro, limoneros, nogales, manzano, peral, palto, entre otros (Shackel et al., 1997; Ortuño et al., 2006b; Mitchan, 2007; Valenzuela, 2011; Beyá-Marshall et al., 2022), sin embargo, para fines de esta investigación, no se han encontrado para el cultivo de naranjos. Gálvez et al. (2015) sugiere

que valores de  $\psi_x$  sobre este umbral indican plantas no estresadas y valores por debajo indican plantas con riego deficiente pudiendo verse afectada la producción. Así, el estado de la planta refleja las condiciones del suelo y los efectos del clima, por lo que es conveniente utilizarla como guía o herramienta para la programación del riego (Shackel et al., 1997; Cohen et al., 2001; Vélez et al., 2007a).

En este sentido, inferir el estado hídrico de la planta, a través de mediciones del contenido de agua en el suelo con sondas de capacitancia es un manejo que permite mejorar la gestión en la toma de decisiones de riego. Sin embargo, la validación de estos manejos debe ser a través de la evaluación directa del estado hídrico de la planta y sus niveles de estrés, de manera que la interpretación de las curvas de extracción de agua del suelo junto con la determinación de las líneas de gestión coincida con ese estado.

## HIPÓTESIS

La programación de riego en naranjos, utilizando líneas de gestión determinadas a través de la interpretación de curvas de extracción de agua en el suelo mediante el uso de sondas FDR validadas con mediciones del estado hídrico de la planta, optimiza el riego manteniendo o mejorando su producción.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Validar las líneas de gestión de riego en naranjos *Citrus sinensis* L. variedad Lane Late con el uso de sondas de capacitancia, evaluando su concordancia con el estado hídrico de la planta, rendimiento, fisiología y calidad de fruto bajo distintas estrategias de riego.

### Objetivos específicos

- Establecer la línea de gestión de la sonda EnviroScan para el cultivo del estudio.
- Determinar la calidad y productividad del naranjo bajo distintas estrategias de riego.
- Determinar las líneas base de potencial xilemático en el cultivo de naranjo.
- Relacionar rendimiento y sus componentes con el estado hídrico de la planta.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Zona de estudio

El ensayo se realizó en la Región de O'Higgins, Provincia de Cachapoal, Comuna de Peumo, en el fundo La Rosa, cuartel Santa Catalina, localizado en las coordenadas 34°19' Latitud Sur y 71°15' Longitud Oeste.

El experimento consta de 4 hileras de 26 árboles de naranjo (*Citrus sinensis* L.) cada una, con un marco de plantación de 6x3 m<sup>2</sup> y sistema de riego por goteo, con goteros separados a 1 m en doble línea, con diferentes caudales en cada tratamiento, los cuales se presentarán más adelante. La variedad corresponde a Lane Late injertado sobre Citrumelo. La edad de los árboles es de 22 años (plantados en 1996).

### Clima

El valle de Peumo es un valle transversal ubicado en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins (36,3° latitud sur), posee un clima mediterráneo subhúmedo (Rivera et al., 2007). Según Santibáñez y Uribe (1993), la localidad de Peumo corresponde al distrito agroclimático 76,2 el cual se caracteriza por presentar temperaturas que varían, en promedio, entre 27,6°C la máxima (enero) y 5,5°C la mínima (julio). Se tiene en promedio tres heladas por año, una precipitación media anual de 709 mm y un período seco de 7 meses. También posee una evapotranspiración potencial anual de 1.181 mm y la humedad relativa en enero es de un 67%, mientras que en julio aumenta a un 85%.

### Suelo

Según CIREN (1996), el fundo en el que se desarrolla el experimento pertenece a la Serie La Rosa, con suelos de tipo Mollisol. Corresponden a suelos de origen aluvial, con texturas desde franco arcillo limosa hasta arcillosa. La fase es LRS-1, la cual corresponde a suelos profundos y bien drenados.

### Metodología

Se realizaron 5 tratamientos: T1, correspondió al riego campo (testigo) en donde la frecuencia y tiempo de riego fue determinada por su línea de gestión utilizando goteros 4 L h<sup>-1</sup>; T2, se aplicó un 20% menos de agua, regando con goteros de 3,2 L h<sup>-1</sup> manteniendo la misma frecuencia y tiempo de riego determinado por la línea de gestión de T1; T3, un 30% más de agua, utilizando goteros de 5,2 L h<sup>-1</sup>, manteniendo la misma frecuencia y tiempo de riego determinado por la línea de gestión de T1; T4, consistió en regar según la línea de gestión definida por la sonda con goteros de 4L h<sup>-1</sup> hasta fin de caída post cuaja y luego un 20% menos de riego (goteros 3,2 L h<sup>-1</sup>); y T5, se regó según la línea de gestión sonda hasta fin de caída post cuaja con gotero de 4 L h<sup>-1</sup> y después, un 40% menos de riego (gotero de 2,4 L h<sup>-1</sup>) hasta cosecha. En la Figura 1 se presenta un resumen de los tratamientos del experimento.

Tratamientos/ Fenología	P. Floración	Cuaja	F. Caída Post cuaja	Crecimiento de fruto	Cosecha
T1	Riego Campo				
T2	20% menos de agua				
T3	30% más de agua				
T4	Riego Campo			20% menos de agua	
T5	Riego Campo			40% menos de agua	

Figura 1. Tratamientos de riego y su extensión. Colores indican la precipitación diferencial con respecto al riego campo (T1).

### Caracterización de suelo

Se realizó una calicata con una profundidad de 100 cm y ancho de 150 cm en el terreno donde se llevó a cabo el experimento, se describió la zona de raíces en donde se definieron tres horizontes, y se determinaron las propiedades físicas de éstos como la clase textural, densidad aparente y macroporosidad.

Se tomaron 8 muestras de suelo con cilindro y 8 muestras de 200 g en bolsas. Se tomaron dos en el primer horizonte, cuatro en el segundo y nuevamente dos en el tercero, para ambos tipos de muestra. Con las muestras de suelo en bolsas se determinó la textura del suelo por el método de Bouyoucos (Beretta et al., 2014), mientras que con las muestras con cilindro se determinó la densidad aparente por el método del cilindro (Gatea et al., 2018) y la distribución del tamaño de poros a través de la determinación de su curva característica, sometiendo las muestras a tensiones de 0,2, 6 y 33 kPa en cama de arena (Sandbox, Ejikelpamp, Holanda) y olla de presión. Para determinar el contenido de agua en punto de marchitez permanente (15000 hPa) se equilibraron muestras de suelo disturbadas en un plato presión.

### Contenido de agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo se midió con dos diferentes sondas: una de medición continua (sonda EnviroScan, Sentek), la cual se ubicó en una de las repeticiones del riego testigo (T1), en una de las hileras centrales (tercera hilera) de manera que se encontrara lo más central posible en el ensayo. Esta se encuentra dentro de un tubo de acceso de PVC instalado dentro del área húmeda de los árboles, a 25 cm del emisor, y presentan sensores a profundidades variables (20, 30, 70 y 80 cm). A partir de esta se definieron las líneas de gestión de riego según la metodología propuesta por Callejas et al., (2013).

Con la sonda de medición discontinua (sonda portable Diviner 2000) se realizó una medición por repetición, cada 10-15 días, antes del riego, durante toda la temporada. El tubo de acceso de esta sonda, al igual que la sonda Enviroscan, se encuentra a 25 cm de la línea del emisor, cerca de uno de los árboles centrales de cada repetición y presentan sensores a profundidades cada 10 cm hasta completar 1 metro.

### Balance hídrico

Se realizó un balance hídrico con el fin de verificar si las reducciones y aumentos en las cantidades de agua de riego de los tratamientos establecidos generaban un estrés en las plantas.

Este balance fue realizado para el tratamiento control, durante las tres temporadas que abarca el ensayo, mediante la siguiente ecuación:

$$BH = R (mm) + Ppe(mm) - P(mm) - ETc(mm)$$

En donde  $BH$  corresponde a la variación del contenido de agua del suelo, en un periodo de tiempo, en función de las entradas y las salidas en el sistema. Las entradas corresponden a todas las variables que ingresan al sistema suelo realizando un aporte de agua, por lo que dentro de la ecuación se presentan con valor positivo. Las salidas corresponden a las variables que dejan el sistema, por lo que son representadas con valores negativos.

La primera entrada es  $R$  que corresponde al agua de riego. Estos datos fueron obtenidos a partir de la plataforma Dropcontrol, la cual entrega los riegos diarios realizados en mm. Para los periodos del 12/09/2017 al 05/11/2017, del 23/05/2018 al 30/09/2018, del 17/05/2019 al 11/08/2019 y del 08/02/2020 al 11/08/20 los datos fueron obtenidos mediante el software IrriMAX. Para esto, se usó el gráfico de sumatoria y se obtuvo el tiempo de riego en minutos (la duración de cada peak) (Figura 2) el cual fue multiplicado por la precipitación del equipo para obtener la altura de agua aplicada.

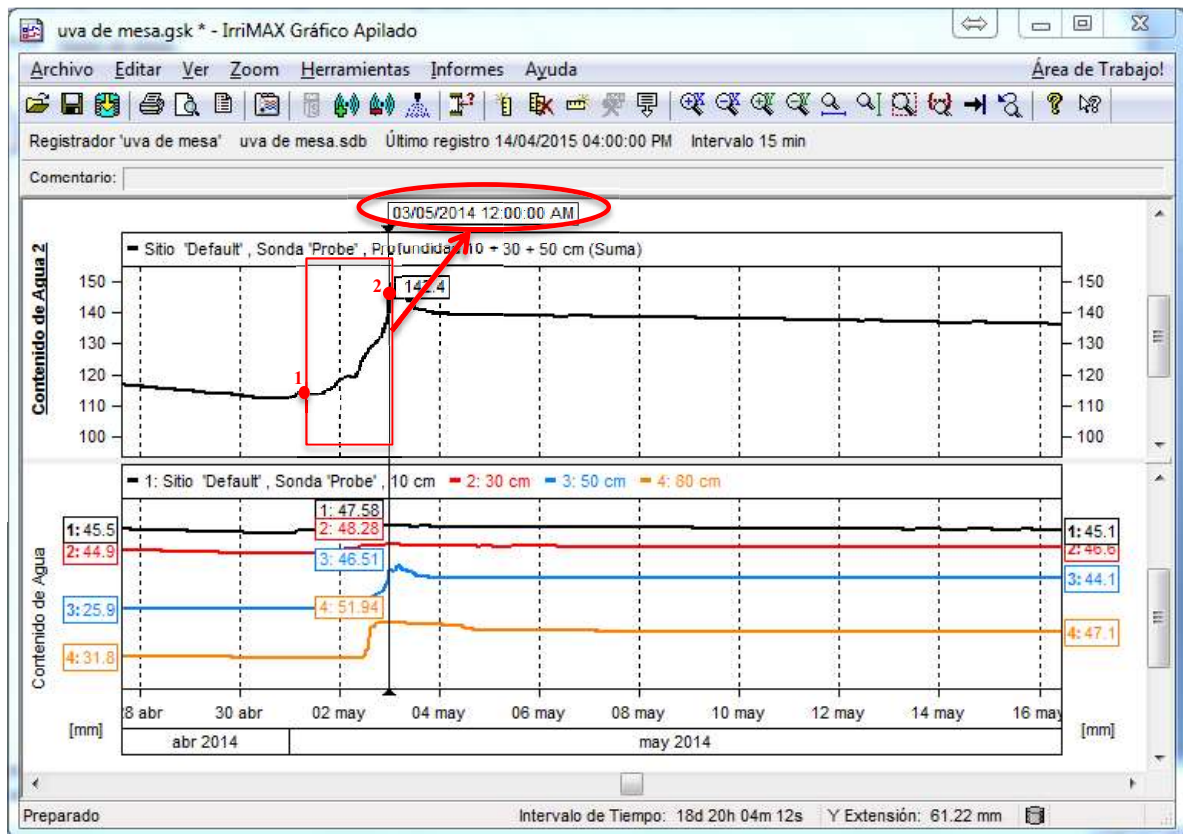


Figura 2. Gráfico de sumatoria (superior) y gráfico de apilado (inferior) generados mediante software IrriMAX. La línea vertical señala la fecha y la hora exacta en la variación de las curvas, las cuales se indican en el rectángulo ubicado en el extremo superior, encerrado en rojo. El rectángulo de color rojo indica la duración del peak, a partir del punto 1 al punto 2.

La segunda entrada corresponde a  $Ppe$ , que es la precipitación efectiva. Esta es el agua que ingresa efectivamente al suelo, la cual se estimó mediante el balance entre la precipitación y la escorrentía superficial (Irigoyen et. al, 1998):



$$Ppe = Pp - Esc$$

La escorrentía superficial (*Esc*) fue calculada mediante el índice de precipitación antecedente (*IPA*) (Shaw, 1994 citado en INIA, 2013):

$$IPA = \frac{Pp_0}{2} + Pp_1 + \frac{Pp_2}{2} + \frac{Pp_3}{3} + \frac{Pp_4}{4} + \frac{Pp_5}{5} + \frac{Pp_6}{6}$$

En donde  $Pp_0$  corresponde a la precipitación del día en mm al que se le está calculando la precipitación efectiva (día 0),  $Pp_1$  corresponde a la precipitación del día -1,  $Pp_2$  a la del día -2,  $Pp_3$  a la del -3,  $Pp_4$  a la del -4,  $Pp_5$  a la del -5 y  $Pp_6$  a la del día -6.

Si  $Pp_0$  es menor a 25,4 mm, se considera como precipitación efectiva.

Dependiendo del valor de *IPA* que se obtenga, es que se define qué ecuación para calcular la escorrentía se ocupará:

$$\text{Si } IPA > 19,0 \text{ entonces } Esc = -2,34 + 0,12 \times Pp_0 + 0,0026 \times Pp_0^2$$

$$\text{Si } IPA > 6,3 \text{ entonces } Esc = -1,14 + 0,042 \times Pp_0 + 0,0026 \times Pp_0^2$$

$$\text{Si } IPA > 6,3 \text{ entonces } Esc = 0,858 - 0,0895 \times Pp_0 + 0,0028 \times Pp_0^2$$

Con lo que respecta a las salidas en la ecuación del balance hídrico, *P* corresponde a la percolación profunda; para cuantificarla se utilizaron los datos que entrega el último sensor de la sonda, debido a que no se evidencia actividad radicular en esa zona, por lo que se asume como supuesto, que esa agua al no ser utilizada por la planta se percola. Estos datos son obtenidos a partir de la plataforma Dropcontrol, que entrega el contenido volumétrico de agua del suelo por sensor y diarios. Estos son multiplicados por la profundidad de medición para determinar su valor en altura.

La evapotranspiración (*ET*) se obtuvo, nuevamente a partir la plataforma Dropcontrol. Para estimarla se utilizó la diferencia diaria de los contenidos de agua volumétricos de los sensores que se encuentran en la zona de raíces (sensor 1, 2 y 3). Cada variación del contenido de agua volumétrico fue multiplicada por la profundidad representativa de cada sensor (Figura 3a), de manera de obtener la variación de la altura del agua. La suma de estas variaciones fue corregida por el porcentaje de superficie que efectivamente está absorbiendo y transpirando. Para esto se asume como superficie transpirable la proyección de la copa en el suelo (Figura 3b) correspondiente a un 70% la superficie en la que se encuentra (ancho de camellón x distancia sobre hilera), la cual se estimó de manera visual en campo al medio día.

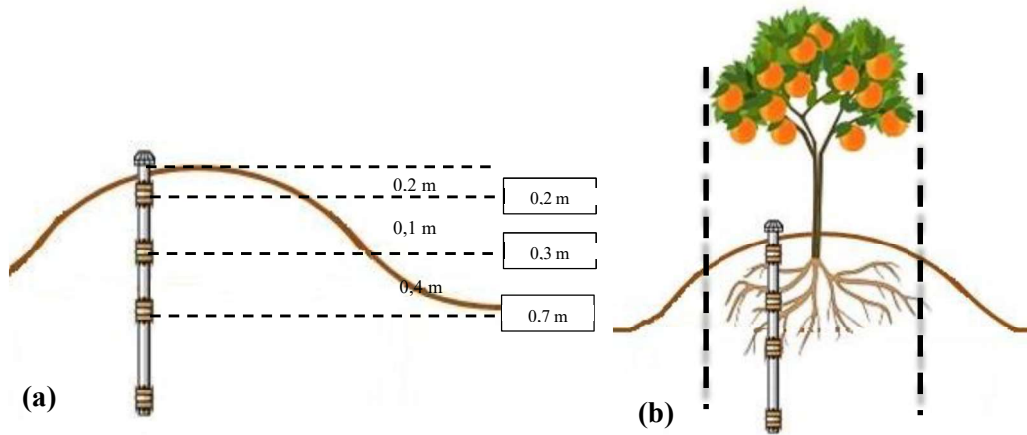


Figura 3. (a) Esquema de profundidad medida por cada sensor en la zona radicular. Cada rectángulo indica la profundidad a la que se encuentra cada sensor de la sonda en la zona radicular. Los valores entre las líneas segmentadas corresponden a la altura entre cada sensor. (b) Imagen explicativa de proyección de copa en el suelo.

Se realizó un segundo balance hídrico sobre el tratamiento control, manteniendo las mismas entradas y salidas, con excepción de la evapotranspiración. Esta fue calculada a partir de los datos de evapotranspiración de la estación meteorológica más cercana y utilizando un  $k_c$  de cítricos sin cobertura de suelo, para el cultivo de naranjo (Allen et. al, 2006):

Cuadro 1. Coeficiente de cultivo para cítricos.

Cultivo	$K_c$	Altura max. cultivo (m)
Cítricos sin cobertura de suelo	0,7	4

### Variabes fisiológicas

Para validar el funcionamiento de la sonda, se realizaron mediciones de potencial xilemático a mediodía como variable indicativa siguiendo el protocolo propuesto por McCutchan y Skachel (1992), en donde las mediciones se realizaron envolviendo dos hojas por árbol con bolsas de aluminio, expuestas al sol, de la temporada anterior (8 meses aproximadamente), sin fruta en la rama y sin daños. Luego de al menos una hora y media envuelta la hoja, se sacan las hojas del árbol y se midieron a la sombra con una bomba Scholander de bombeo manual, antes del transcurso de un minuto. Las mediciones se efectuaron cada 15 días antes de un riego o recarga hídrica, en días despejados. La medición se realizó en uno de los árboles del centro de cada repetición. Se midió previamente la temperatura y humedad relativa, con un termohigrómetro digital para determinar el déficit de presión de vapor (DPV). Mientras se realizaban las mediciones de potencial xilemático, éste fue colocado en el tratamiento que se encontraba en el centro de la hilera que se estaba midiendo; cuando se procedía a medir los tratamientos de la siguiente hilera, el termohigrómetro era cambiado de lugar nuevamente al tratamiento central de la hilera que se estaba midiendo, obteniendo así, una medición de temperatura y humedad relativa por bloque (hilera).

## Crecimiento

Con el fin de normalizar los resultados de producción y disminuir su variación a causa del vigor, se utilizó el factor de volumen de copa. Para eso, se asumió una forma elipsoide que define el volumen mediante la siguiente ecuación (Turrel, 1961):

$$Volumen = \frac{4\pi}{3} \times \left( \frac{\text{diámetro trans} - \text{diámetro long}}{2} \right)^2 \times \frac{\text{altura}}{2}$$

En donde, *diámetro trans* corresponde al diámetro transversal, es decir, el eje que atraviesa el ancho de la copa del árbol por el centro; *diámetro long* corresponde al longitudinal, el eje que atraviesa la altura de la copa (desde la parte más baja del follaje, hasta la más alta) por el centro; y altura se refiere a la altura del árbol desde el suelo en donde se encuentra hasta la parte más alta de la copa.

Esta medición fue realizada posterior a la cosecha, al inicio de cada temporada evaluando la unidad observacional (definida más adelante, en el ítem “Análisis estadístico”), por repetición.

## Crecimiento de fruto

Al momento de la cuaja, se marcaron 20 frutos de cada unidad observacional por repetición, con el fin de medir el diámetro ecuatorial con un pie de metro a lo largo de la temporada. Estas mediciones se realizaron dos veces al mes hasta el momento de cosecha.

## Producción

Finalmente, a cosecha se pesó el total de frutos de uno de los árboles centrales de cada tratamiento, por repetición. También, se realizó para cada unidad observacional una muestra de 100 frutos, los cuales fueron pesados para establecer la distribución de calibres comerciales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Escala de diámetros comerciales para cada calibre de naranjas.

Naranjas	
Calibre	Escala de diámetros (mm)
3	> 81
4	77 – 81
5	73 – 77
6	70 – 73
7	< 70

Fuente: Reglamento (CE) n° 1799/2001

Se tomó una muestra de 20 frutos por unidad observacional y se midió grosor de cáscara, sólidos solubles totales con un refractómetro, acidez mediante el método de acidez titulable con NaOH al 0,1N y porcentaje de jugo, como variables relacionadas con la calidad de la

fruta. Se realizó una relación entre la cantidad de sólidos solubles y la acidez para poder obtener el índice de madurez.

Se estimó la eficiencia productiva, carga frutal y eficiencia de producción, a partir de las fórmulas presentadas en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Resumen de fórmulas utilizadas para evaluar la producción.

<b>Indicador</b>	<b>Fórmula</b>
Producción	Kg de fruta / árbol
Índice de madurez	Sólidos solubles / acidez titulable
Productividad	kg de fruta / volumen de copa
Carga frutal	Nº de frutos / volumen de copa o árbol

### **Análisis estadístico**

El experimento correspondió a un diseño en bloque completamente aleatorizado, en donde el factor de bloqueo está dado por las hileras, debido a que los manejos de campos se hacen por hilera, por lo que el efecto de estos repercute de igual manera en todos los tratamientos del bloque. La unidad experimental son 4 árboles, mientras que la unidad observacional corresponde a uno de los dos árboles centrales. Se realizarán 4 repeticiones por tratamiento.

El análisis de los datos se realizó mediante análisis de la varianza (ANDEVA), en el caso de que se encuentren diferencias significativas se realizó una prueba de comparaciones múltiples LSD de Fisher ( $\alpha=0,05$ ) para ver el desempeño de los tratamientos. En las variables de tamaño de fruto, producción y productividad, se utilizó la carga frutal como covariable para tener en cuenta el efecto que tiene esta sobre las variables mencionadas.

Para el análisis de las mediciones de potencial diarias por tratamiento, nuevamente se realizó un análisis de la varianza (ANDEVA), y en los casos que se encontraron diferencias significativas, se realizó la prueba de comparación múltiple LSD de Fisher ( $\alpha=0,05$ ).

Además, se utilizó un análisis de regresión para predecir valores en la generación de la línea base de referencia, con variable dependiente: potencial xilemático y variable independiente: DPV. Para comparar las pendientes e interceptos de estas rectas, se realizaron pruebas F y T-Student.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Caracterización del suelo

Se determinaron tres horizontes en el perfil de suelo hasta los primeros 100 cm, profundidad a la que llega el último sensor de la sonda de capacitancia. A partir de las muestras con cilindros se establecieron las características físicas de suelo para cada horizonte, las cuales se resumen en las siguientes tablas:

Cuadro 4. Características físicas del perfil de suelo. Cada valor corresponde al promedio de dos muestras, para el caso de la primera estrata, cuatro para la segunda y dos para la tercera.

Estratas (cm)	Da ( $g/cm^3$ )	CC (%)	PMP (%)	Porosidad (%)	Macroporosidad (%)
0-25	1,23	43,26	19,66	53,6	11,7
25-70	1,44	35,16	23,26	45,7	9,11
70-100	1,43	35,67	24,08	46,17	10,06

Da: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente

Cuadro 5. Distribución de poros por estrata. Valores corresponden a contenidos de agua volumétricos.

Estratas (cm)	PDR (%)	PDL (%)	HA (%)
0-25	8,8	2,9	23,6
25-75	6,1	3,1	11,9
75-100	7,2	2,8	11,6

PDR: poros de drenaje rápido, PDL: poros de drenaje lento, HA: humedad aprovechable.

Los suelos franco arcillo limosos de la serie La Rosa, en la región del Libertador Bernardo O'Higgins tienden a tener valores de densidad aparente entre 1,14 y 1,25  $g/cm^3$ , según CIREN (1996). En el cuadro 4, se puede observar que ésta, en el segundo y tercer horizonte se encuentra por sobre estos valores. La macroporosidad (responsable del movimiento rápido de agua en el suelo cuando está saturado, permitiendo la aireación de éste) también se ve disminuida por horizontes, siendo este porcentaje inferior a 12%, el cual es el mínimo necesario para un buen desarrollo de raíces en cítricos (Santana et al., 2006). Además, el suelo estudiado presenta un bajo porcentaje de PDR (poros de drenaje rápido) en todas sus estratas (Cuadro 5) en comparación al 15% óptimo para frutales que propone Dexter (1988). Ambos valores se podrían traducir en problemas de aireación del suelo y en el flujo rápido de agua, lo que finalmente, sumado al aumento de la densidad aparente en profundidad, podría indicar un posible grado de degradación en el suelo, principalmente después de los primeros 25 cm.

El análisis granulométrico determinó que la clase textural del suelo corresponde a franco arcillo limosa (FAL) para los tres horizontes descritos. La distribución de raíces (Figura 4) observada en las calicatas, indica que la mayor cantidad de raíces finas absorbentes se encontraron en los primeros 75 cm de suelo. Después de los 90 cm, no se encuentran raíces visibles.

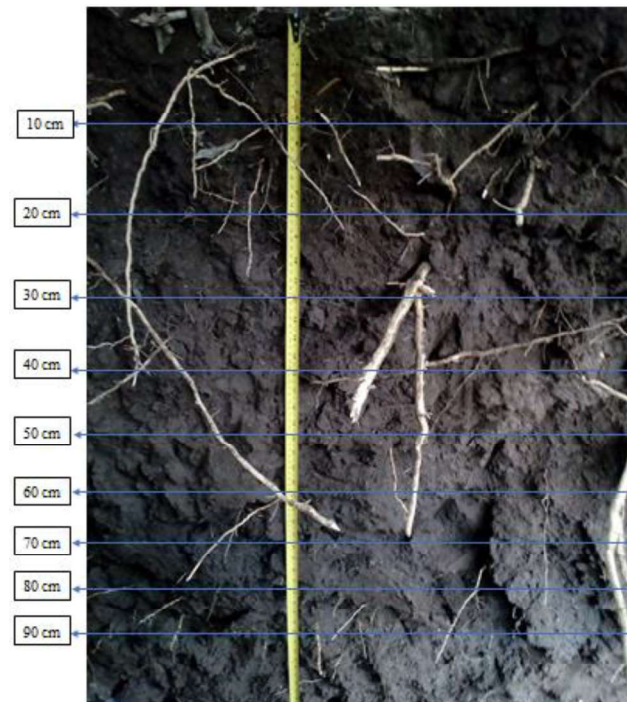


Figura 4. Distribución de raíces en perfil de calicata del sector.

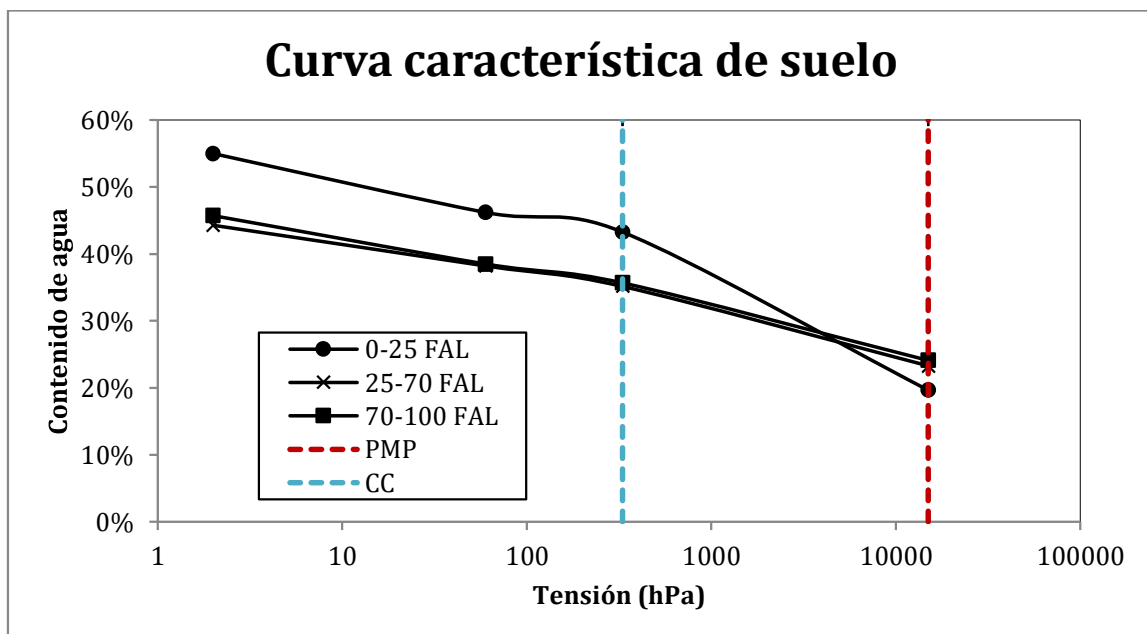


Figura 5. Curva característica de suelos por horizontes, Fundo La Rosa, en donde se tomaron 2 muestras para el primer horizonte, cuatro para el segundo y dos para el tercero. Cada punto corresponde al valor promedio de las muestras a los 2, 60, 330 y 15000 hPa. Cada línea representa una estrata de suelo, mientras que las líneas punteadas verticales, indican Capacidad de campo (CC) a los 330 hPa y Punto de marchitez permanente (PMP) a los 15000 hPa.

Las muestras de cilindros obtenidas por horizontes fueron sometidas a tensiones para determinar la curva característica de suelo (Figura 5). Las líneas verticales punteadas marcan los 330 y 15000 hPa, correspondientes a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez

permanente (PMP), respectivamente. Se observa que a CC, el primer horizonte del suelo presenta un contenido de agua volumétrico de 43,26%, mientras que los dos siguientes tienen un valor inferior al primero, pero similar entre ellos (35,16% y 35,67% en el segundo y tercer horizontes, respectivamente) (Cuadro 4); esta diferencia podría darse por la presencia de materia orgánica en superficie. Los restos de poda quedaban en la superficie de los camellones, lo cual estaría favoreciendo la retención de agua en los primeros centímetros de suelo. Con respecto a los valores de PMP, ocurre el inverso de CC, en el primer horizonte el valor es de 19,66%, y los dos siguientes obtienen valores más altos muy similares entre ellos.

### Determinación de Línea de Gestión (LG)

Para establecer la línea de gestión, se utilizó el gráfico de apilado y sumatoria del contenido de agua del suelo, generado por el software IrriMAX, con los datos entregados por la sonda medición continua Envirosca. A partir de esto, se realiza una interpretación visual del consumo de agua del suelo, según cómo varía el contenido de agua en el suelo: cada peak representa un riego, cada caída representa el consumo de agua diario y cada línea horizontal representa la noche, ya que no hay evapotranspiración por lo que la curva se mantiene estable.

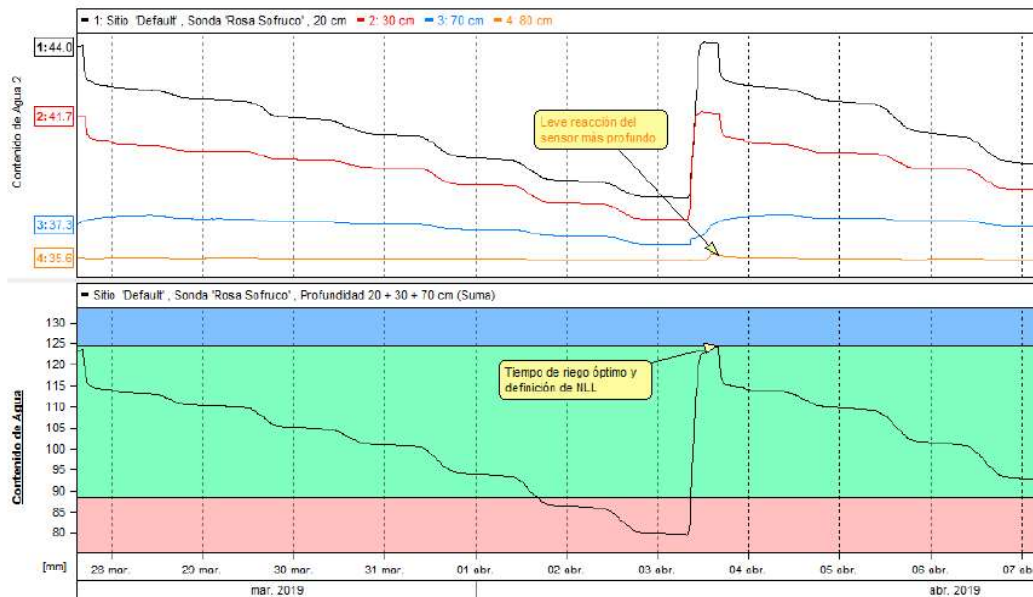


Figura 6. Gráfico de apilado (superior) y gráfico de sumatoria (inferior) generado mediante software Irrimax para determinación del nivel de lleno, representando el mismo momento de riego. El eje vertical a la izquierda del gráfico superior indica el contenido de agua volumétrica a distintas profundidades: 20, 30, 70 y 80 cm. En el gráfico de sumatoria se señala el peak que se genera en la zona de actividad radicular, justo en el momento en que en el gráfico de apilado se produce un leve aumento en el último sensor.

A finales de marzo e inicios de abril del año 2019 fue que se determinó el nivel de lleno. En el gráfico de apilado, la curva del último sensor de la sonda (80 cm) tiende a mantenerse paralela al eje X, debido a que en esta zona no hay presencia de raíces que absorban agua. Al evidenciarse un leve aumento en esta curva (Figura 6, gráfico superior), como el señalado mediante la flecha, se entiende que el agua llegó hasta más abajo de la zona radical. Es en este momento en que el riego debe ser detenido, de manera de que no ocurra la percolación

profunda (si se evidencian caídas en esta curva, al no existir raíces en esta zona, se asumen como pérdidas por percolación). Al detener el riego, la curva del último sensor se estabilizará nuevamente y volverá a tender a ser paralela al eje X. Así se entiende este momento como el nivel de lleno, es decir, el momento en que el suelo se encuentra con la mayor cantidad de agua sin que haya pérdidas por percolación. En este mismo instante, la flecha señalada en el gráfico de sumatoria (Figura 6, gráfico inferior) indica el momento en que debo finalizar el riego para lograr esta cantidad de agua en el suelo (tiempo de riego).

Si bien, el nivel de lleno establece el tiempo de riego para que el suelo se encuentre con agua sin que haya percolación, al observar el gráfico de sumatoria en uno de los meses más calurosos (febrero) se identificó una reducción en el consumo de agua durante los primeros tres días (Figura 7). Esto se entiende como una baja actividad de absorción por la planta, lo que sugirió falta de aireación o hipoxia, generado por riego excesivo. A partir de esto, se tomó la decisión de reducir el tiempo de irrigación, al punto de llegar a capacidad de campo en lugar de nivel de llenado.

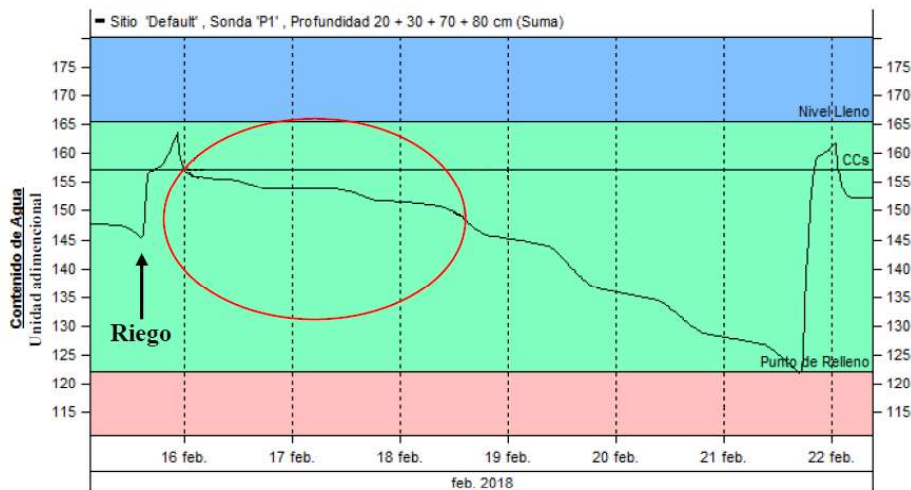


Figura 7. Gráfico de sumatoria generado mediante software IrriMAX. Cada peak representa un riego (señalado en el primer peak). El círculo rojo señala los tres primeros días después de un riego, en donde las caídas diarias son muy leves.

Por otro lado, el momento de riego se determina mediante la respuesta de los descensos observados en la curva del gráfico de sumatoria y según las condiciones ambientales. Cuando gráficamente la tasa de extracción de agua del suelo disminuye a una misma y constante demanda atmosférica, se interpreta como una señal de estrés por parte de la planta gatillada por la mayor tensión del agua en el suelo; es este momento el que se define como el punto de recarga de la línea de gestión.

En la primera temporada (2018), debido a que la ocurrencia de los riegos era bastante frecuente, el punto de recarga se definió como el contenido de agua más bajo medido en el suelo. Posteriormente, fue redefinido en marzo del 2019 (Figura 8), coincidiendo con el primer valor establecido.



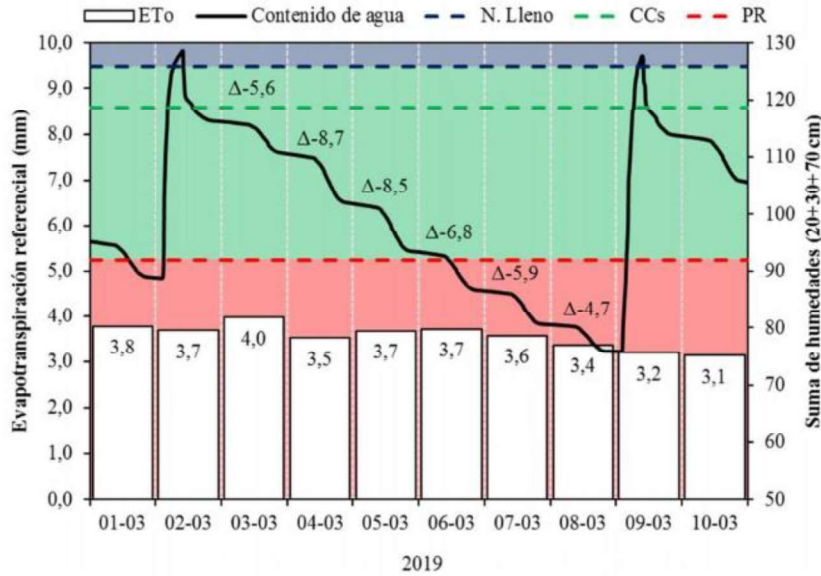


Figura 8. Determinación de la línea de gestión desde el 1 de marzo 2019 al 10 de marzo del mismo año. Punto de recarga (PR, línea roja), Capacidad de campo (CCs, línea verde), nivel de lleno (N. Lleno, línea azul), variación del contenido de agua en el suelo (línea negra continua), evapotranspiración de referencia similar (barras blancas), caídas diarias de humedad ( $\Delta$ ).

En la figura 8, se puede observar cómo a una demanda evaporativa similar y constante durante 10 días aproximadamente, las caídas diarias de la curva de contenido de agua se van haciendo más pequeñas, lo que se entiende como que el agua del suelo se ha ido agotando y a la planta le está costando mayor trabajo absorberla. Así, la diferencia de las caídas entre los días 05/03 (-8,5) y 06/03 (-6,8) es de un 17% por lo que se establece el punto de recarga en el contenido de agua del día 05/03, el cual corresponde al día anterior a la reducción, en un casi 20% (Thompson, et al., 2007).

Finalmente, el contenido de agua del suelo para cada línea horizontal paralela que conforma la línea de gestión se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 6. Variación del contenido de agua del suelo según la línea de gestión establecida.

Nivel de Lleno (NLL)	Capacidad de Campo (CC)	Punto de Recarga (PR)
$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$
126,008	118,644	91,896

### Balance hídrico del suelo

La figura 9 corresponde a los gráficos de balance hídrico con evapotranspiración estimada a partir de la sonda Enviroscan (BH-1), mediante la evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica y el coeficiente del cultivo (kc) (BH-2).

El balance se inicia el 13 de junio del 2018, dado que en esa fecha todos los tratamientos se encontraban con la misma cantidad de agua en el suelo. Esta medida fue corroborada mediante la medición con Diviner 2000 en cada tratamiento.

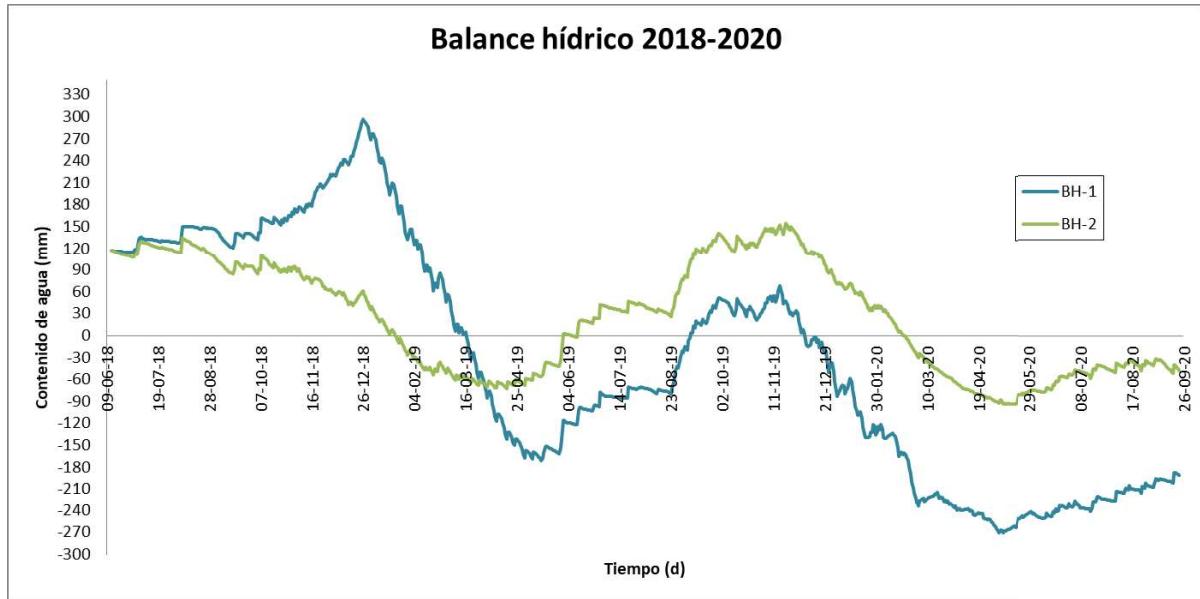


Figura 9. Gráfico balance hídrico de las tres temporadas evaluadas. La curva celeste (BH-1) representa el balance hídrico en donde la evapotranspiración fue obtenida mediante datos de la sonda Enviroscan. La curva verde (BH-2) corresponde a la del balance hídrico, en donde la evapotranspiración se estimó a partir de los datos obtenidos mediante la estación meteorológica y el kc del naranjo.

En la figura 9 se observan una serie de caídas en las curvas que son mayores que las alzas diarias, por lo que la curva tiende a descender durante los meses más calurosos, que corresponden a los periodos secos que van desde diciembre hasta marzo aproximadamente. Durante esos meses los peaks diarios que se observan corresponden netamente a riegos. De abril en adelante aproximadamente, la curva comienza a ascender durante los meses más fríos, en este periodo, los peaks diarios observados corresponden a precipitaciones y riegos. Cabe mencionar, que a partir de los datos obtenidos mediante la estación meteorológica, se observó una baja en las precipitaciones anuales con respecto a la promedio mencionada por Santibáñez y Uribe (1993). En el 2018 se obtiene una suma de 298,7 mm, en el 2019 una de 147 mm y en el 2020 una 63,9 mm contabilizados hasta septiembre.

El cuadro 7 presenta el valor acumulado del balance para las dos metodologías utilizadas. Se observa que ambos balances tienen un resultado negativo, lo que permite inferir que el resto de los ensayos exceptuando por el T3 (R. Campo +30%), que no se produjo un exceso de riego, sino que existe un déficit de éste.

Cuadro 7. Cantidad de agua en mm de entradas y salidas, para ambos balances hídricos.

	Entradas		Salidas		Total
	Precipitación efectiva (mm)	Riegos (mm)	Evapotranspiración (mm)	Percolación (mm)	
Balance Hídrico 1	288,11	1186,45	1759,52	24,88	-309,84
Balance Hídrico 2	288,11	1186,45	1615,39	24,88	-165,70

## Contenido de agua en el suelo

En la figura 10 (gráfico izquierdo), se puede apreciar el comportamiento del agua en el suelo a lo largo del ensayo. En la primera temporada, entre los meses de enero y abril del 2018 (fase II de crecimiento de fruto) el contenido de agua en el suelo llegó a sus niveles más bajos, lo que se entiende debido a que, en este periodo se encuentran los meses más calurosos de la temporada. Como era de esperarse, los tratamientos 4 y 5 (R. campo y luego -20% F.C.P.C y R. campo y luego -40% F.C.P.C, respectivamente), que presentan una reducción en la cantidad de agua de riego aplicada justo para el inicio de la fase II, llegan a valores inferiores del punto de recarga establecido por la línea de gestión, mientras que T1 y T3 (R. Campo y R. Campo +30%, respectivamente), presentan valores más altos por sobre la línea de recarga. Si bien, se marca esta diferencia entre los tratamientos con menos y más agua, se esperaba que las curvas de todos los tratamientos se encontraran más por debajo de los resultados obtenidos. Esto no ocurrió así, porque, al observar la curva de la sonda Enviroscan (línea verde oscuro continua) se ve que suele mantenerse por sobre el punto de recarga con numerosos y seguidos peaks durante toda la primera temporada, lo que demuestra que se regó sin permitir que el agua del suelo se fuera agotando lo suficiente para llegar al punto de recarga establecido. Por lo tanto, el protocolo de riego no se adaptó a la línea de gestión, por lo que no se puede asumir que los tratamientos con restricción hídrica fueron efectivos, ni que generaron el estrés que se pretendía.

La segunda temporada presenta un comportamiento similar, sin embargo, en esta oportunidad los manejos de riego fueron controlados de mejor manera, de tal forma que entre enero y abril del 2019 (Fase II), la variación del contenido de agua en el suelo en todos los tratamientos llegó a valores inferiores al del punto de recarga, con excepción de T3, el cual se mantuvo cercano a este último. El detalle de la curva de la sonda Enviroscan para el mismo periodo evidencia lo ya mencionado con respecto a T1, en donde se encuentran al menos 9 oportunidades en donde el contenido de agua del suelo se encuentra por debajo del punto de recarga. Dado lo anterior el T3 se presenta como el más cercano a lo condición de programación adecuado siguiendo la línea de gestión y no T1 (R. Campo) como era de esperarse. Estos resultados muestran que, si bien hubo un intento por manejar la programación de riego según la línea de gestión establecida, tampoco fue el adecuado.

En el caso de la tercera temporada, las bajas en el contenido de agua se vieron adelantadas a la fase I de crecimiento; nuevamente T4 y T5 presentan los valores más bajos, sin embargo, durante la fase II todos los tratamientos indican valores altos, los cuales se encuentran por sobre el punto de recarga, y en el caso de T5, al límite de este. Esto se mantiene hasta el final de la temporada, resultando extraño debido a que, como se dijo anteriormente, en esta fase se encuentran los meses más calurosos y además inician las reducciones de agua en los tratamientos 4 y 5.

Durante las tres temporadas, tanto la sonda Enviroscan como la Diviner 2000, muestran contenidos de agua por sobre la línea de recarga durante la fase III, lo que también se puede atribuir a que hay una menor transpiración por parte de las plantas, debido a las bajas temperaturas de los meses de mayo a agosto. Aun así, se ven peaks asociados a riegos muy frecuentes, antes de llegar a la línea de recarga.

Cabe destacar, que durante las tres temporadas, las curvas de variación de contenido de agua se mantienen por debajo del nivel de lleno establecido por la línea de gestión incluso cuando

alcanza sus niveles más altos; y que las restricciones hídricas aplicadas en todos los tratamientos solamente se pueden apreciar durante las fases II de crecimiento de fruto.

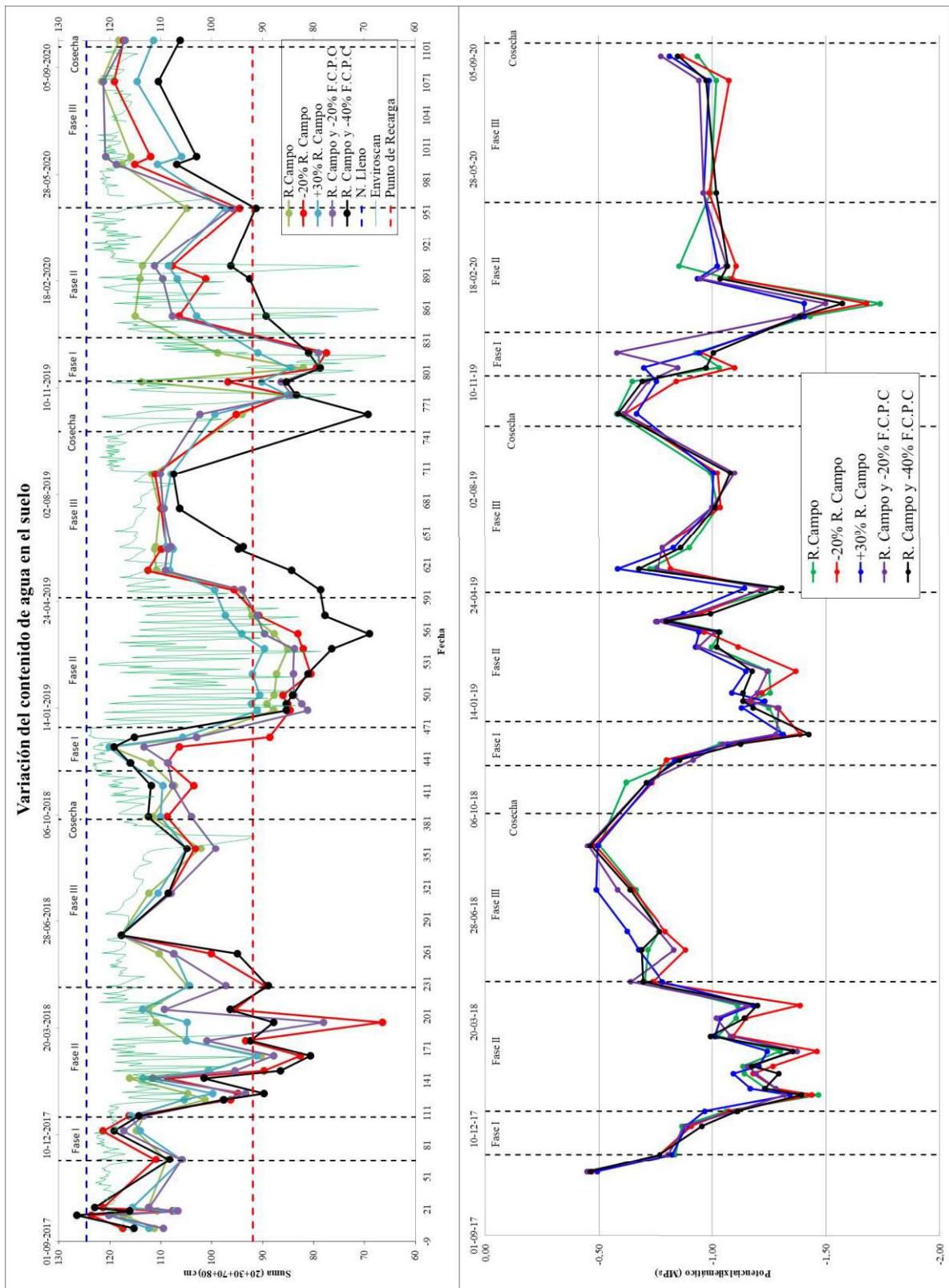


Figura 10. A la izquierda, mediciones discontinuas del contenido volumétrico de agua en el suelo durante las tres temporadas del ensayo con Diviner 2000 contrastadas con mediciones continuas de sonda Enviroscan. Cada punto corresponde a un valor promedio de cada

repetición por tratamiento en el día medido. Líneas segmentadas verticales corresponden al inicio y término de las fases de crecimiento del fruto en cada temporada. El inicio de la fase II establece el cambio de goteros para los tratamientos 4 y 5. Líneas segmentadas horizontales indican los niveles de Punto de recarga (roja) y Nivel de lleno (azul). A la derecha, potencial xilemático de cada tratamiento por fecha de medición durante tres temporadas. Líneas verticales punteadas representan las distintas fases de crecimiento de fruto, y el momento de cosecha para cada temporada.

### Variabes fisiológicas

La figura 10 (gráfico de la derecha), presenta la curva de potencial xilemático en los días medidos para cada tratamiento. Durante las tres temporadas, la mayoría de los valores de potencial xilemático se encuentran dentro de los rangos mencionados por Ballester et al. (2013), quien describe que valores entre -1,2 y -1,3 MPa no generan pérdidas en los rendimientos de naranjos Navel Lane Late.

Se observa cómo la curva de potencial de todos los tratamientos se comporta similar a la de contenido de agua en el suelo, durante la primera temporada. Durante la fase II (meses entre enero y abril), el potencial xilemático alcanza sus valores más negativos, debido al aumento de las temperaturas y a la baja humedad relativa.

También se observa que los T2, T4 y T5 presentan sus curvas de potencial más abajo que T3 y que T1, lo que coincide con las bajas en el contenido de agua en el suelo, producto de las reducciones en los respectivos tratamientos (Kramer, 1989 citado en Garzón Correa et al., 2013). Frente a estas reducciones en este periodo, se esperaba que T5 tuviera los valores de potencial más bajos, debido a que es el tratamiento con mayor restricción de agua (R. Campo y -40% luego de fin de caída de post cuaja), sin embargo, T2 se mantiene por debajo del resto de los tratamientos, llegando a sus valores más bajos (-1,46 y -1,39 MPa los más bajos) y presentando diferencias estadísticas significativas en dos oportunidades con el resto de los tratamientos (Cuadro 8). Estas diferencias corresponden a un 17,6% del total de mediciones realizadas en la temporada, por lo que no se consideran determinantes para evaluar el efecto de las restricciones hídricas en la planta. Además, si bien ambos valores anteriormente mencionados se encuentran bajo el rango descrito, Gasque et al. (2016) define que valores de potencial sobre -2,0 MPa no generan efectos negativos sobre la calidad o rendimiento.

Cuadro 8. Diferencias estadísticas estimadas en potencial xilemático por fase, para cada temporada. Cada valor corresponde al promedio de las cuatro repeticiones por tratamiento en MPa. Las fechas que no se presentan en el cuadro, no evidenciaron diferencias estadísticas significativas.

Tratamiento	Temporada 1			Temporada 2		Temporada 3
	Fase II		Fase III	Fase II		Fase III
	31/01/18	05/04/18	22/07/18	12/02/19	07/03/19	11/09/20
R. Campo	1,14±0,04 b	1,13±0,06 b	0,66±0,03 a	1,25±0,03 a	0,99±0,03 b	0,93±0,03 a
-20% R. Campo	1,18±0,04 ab	1,38±0,06 a	0,65±0,03 a	1,36±0,03 b	1,11±0,03 a	0,86±0,03 ab
+30% R. Campo	1,09±0,04 b	1,18±0,06 b	0,48±0,03 b	1,15±0,03 a	0,92±0,03 b	0,81±0,03 b
R. Campo y -20% F.C.P.C	1,19±0,04 ab	1,15±0,06 b	0,58±0,03 a	1,24±0,03 a	0,94±0,03 b	0,77±0,03 b
R. Campo y -40% F.C.P.C	1,29±0,04 a	1,20±0,06 b	0,63±0,03 a	1,17±0,03 a	1,02±0,03 ab	0,85±0,03 ab
Significancia (p-value)	0,0346	0,0419	0,0025	0,0022	0,0103	0,0224

Con respecto a la fase III, ambas curvas (potencial y contenido de agua) aumentan, es decir, al aumentar el contenido de agua disponible para la planta, el potencial xilemático aumenta llegando a valores cercanos a los  $-0,5$  MPa, lo que se entiende como que la planta no está estresada (Sellés et al., 2002).

Los potencial medidos son bastante similares entre ellos (a excepción de los antes mencionados) y no representan valores de estrés para la planta, y como la curva de variación de contenido de agua se mantuvo por sobre los niveles esperados pero dentro de la humedad aprovechable, se infiere que el aumento y las restricciones de aguas correspondientes a los distintos tratamientos no tuvieron el efecto que se esperaba en el potencial, por lo tanto, para efectos de esta temporada, no fue posible validar la línea de gestión con estas mediciones.

En la temporada dos, nuevamente la curva de potencial se comporta similar a la de contenido de agua (disminuye el contenido de agua, bajan los potenciales). Como se mencionó anteriormente, T3 se mantuvo en el punto de recarga durante la fase II, siendo así el único tratamiento regido por la línea de gestión; los valores de potencial de este tratamiento se mantienen dentro de los rangos aceptables mencionados anteriormente, por lo que (para este caso) la línea de gestión estaría funcionando de manera óptima. Sin embargo, la curva de potencial de T3 no presenta valores visualmente distintos al del resto de los tratamientos y solo en dos fechas se generan diferencias estadísticas significativas con T2 (Cuadro 8), el cual presenta los valores más negativos de potencial. Estas diferencias corresponden a un 11,7% del total de las mediciones, y considerando que los valores se encuentran dentro de los rangos definidos como óptimos anteriormente, se sugiere que nuevamente las restricciones hídricas aplicadas no generaron un estrés en la planta.

La fase III de la temporada dos presenta un comportamiento distinto al mencionado en la temporada anterior. Se puede observar que al momento en que aumenta el contenido de agua en el suelo, la curva de potencial cae en lugar de aumentar. Como el contenido de agua se encuentra dentro de los parámetros de la línea de gestión, los valores de potencial están dentro de los rangos de no estrés (Ortuño, et al., 2006a; Vélez et al., 2007; Pérez-Pérez et al., 2008; Ballester et al., 2013) y las fechas corresponden a meses de invierno en donde los días soleados son menos frecuentes, este comportamiento podría deberse a una desestabilización del potencial xilemático, puesto que la variación de las condiciones ambientales durante el día (como el paso de nubes) genera fluctuaciones en los valores de potencial (Jones, 2004; Williams et al., 2012; Beyá-Marshall et al., 2020). Sin embargo, se evidencian tres mediciones seguidas con el contenido de agua cercano al nivel de lleno que a su vez presentan potenciales cercanos a  $-1,0$  MPa, y cuando ocurre una caída en la variación del contenido de agua, el potencial aumenta a valores cercanos a los  $-0,5$  MPa. Al observar la curva de la sonda continua Enviroscan, se ven frecuentes peaks que representan entradas de agua. Considerando esto y que el suelo presenta un bajo porcentaje de PDR, el comportamiento de la curva podría estar asociado a un posible estrés por hipoxia, ya que las frecuentes y constantes entradas de agua en un periodo en donde la evapotranspiración de la planta disminuye y no hay un flujo rápido de agua en suelo explican la caída de los potenciales, y al momento en que el contenido de agua disminuye (es decir, el suelo se airea) el potencial aumenta.

Como se mencionó anteriormente, la temporada tres presenta un comportamiento confuso y poco concluyente con respecto a las curvas de la figura 10. Considerando que las caídas en la variación de contenido de agua en la fase I, se ven más pronunciadas que en las temporadas

anteriores, se esperaría ver potenciales más negativos o diferencias más marcadas entre ellos, sin embargo, los potenciales de todos los tratamientos se observan cercanos a  $-1,0$  MPa y no se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre ellos. Luego, en la fase II, se genera una caída en los potenciales en donde T1 llega al valor más bajo de todas las temporadas ( $-1,74$  MPa), lo que no se condice con los contenidos de agua de los tratamientos en ese mismo momento, los cuales se encuentran por sobre la línea de recarga (excepto T5, que se encuentra en el límite de esta), y particularmente T1 es el que presenta la curva más alta. Si bien, esto podría ser explicado por la desestabilización de potencial en días parcialmente nublados, no se registró esta condición al momento de tomar los datos, por lo que no se puede asumir como determinante. Posterior a esto, la variación de los contenidos de agua se mantiene por sobre la línea de recarga hasta el final de la temporada y todos los potenciales de todos los tratamientos aumentan y se mantienen en o sobre los  $-1,0$  MPa.

Finalmente, las diferencias estadísticas presentadas en el cuadro 8 corresponden a un bajo porcentaje del total de muestras (17,6% en la primera temporada, 11,7% en la segunda y 9% en la tercera), las curvas de potencial no evidencian claras diferencias visuales de comportamiento entre tratamientos y los valores de potencial obtenidos se encuentran dentro de los rangos en donde no se genera un estrés productivo. Por otro lado, en ninguna temporada se manifiestan riegos manejados en función de la línea de gestión establecida, los tratamientos suelen mantenerse por sobre el punto de recarga en todas las temporadas, a excepción de las fases II de crecimiento de fruto. Por lo tanto, al observar los datos de este momento en particular, la programación de riego en naranjos utilizando la línea de gestión podría ser validada mediante mediciones de potencial xilemático, permitiendo así restringir más la línea de gestión, retrasando el momento de riego, sin generar estrés en la planta.

### **Crecimiento de fruto**

El crecimiento de fruto de la primera y segunda temporada se evidencia en la Figura 11a y 11b. Se puede observar que en la fase I y II la pendiente de la curva es mayor que en la fase III, es decir, la tasa de crecimiento de las primeras dos fases es mayor que la de la última fase.

La fase II del crecimiento de fruto corresponde a la división celular, en donde se comienza a determinar el tamaño y peso del fruto (Ordúz-Rodríguez et al., 2009); en la primera temporada se evidencian dos momentos en que las mediciones de potencial fueron estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 8). Al observar la figura 11a, que muestra la curva de crecimiento de fruto de la primera temporada, el comportamiento de las curvas de todos los tratamientos es similar y no se distinguen claramente unas de otras, por lo que los bajos valores de potencial y sus respectivas diferencias estadísticas entre ellos no generaron un estrés que influyera en el diámetro del fruto.

En la temporada dos, en la fase II (Figura 11b) se evidencia una leve distinción entre las curvas que se mantiene hasta el momento de la cosecha, en donde T4 y T2 presentan los mayores diámetros. Esto podría asociarse, en el caso de T2, a que las diferencias estadísticas de potencial que se dieron durante esta fase (Cuadro 8) podrían haber tenido un efecto en el crecimiento del fruto.

Para el caso de la temporada tres, la curva de crecimiento no fue posible realizarla, debido al contexto sanitario del momento. Aun así, no se evidenciaron diferencias estadísticas en ninguna medición de potencial durante la fase II (Cuadro 8).



Finalmente, en ninguna de las temporadas las curvas de crecimiento resultan determinantes en sus diferencias ni evidencian coincidencias en los tratamientos con mayor diámetro al momento de la cosecha: en la temporada uno, T3 concluye su crecimiento con mayor diámetro, y en la temporada dos, T4; por lo que no se podría asociar, para efectos de este ensayo, que las restricciones hídricas durante la fase II generaran un efecto en el diámetro del fruto al momento de la cosecha.

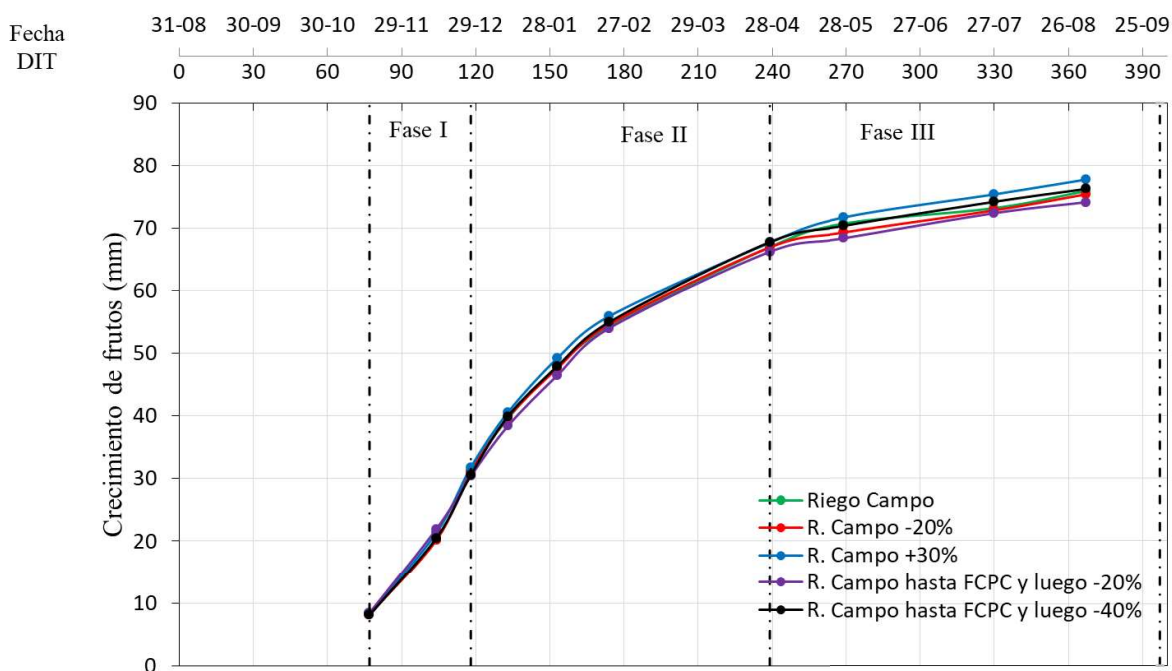


Figura 11a. Curva crecimiento de fruto 1° temporada. Cada punto corresponde al promedio de las repeticiones por tratamiento. A su vez, cada repetición corresponde al promedio de 20 frutos. Líneas verticales segmentadas representan el inicio y término de cada fase de crecimiento.

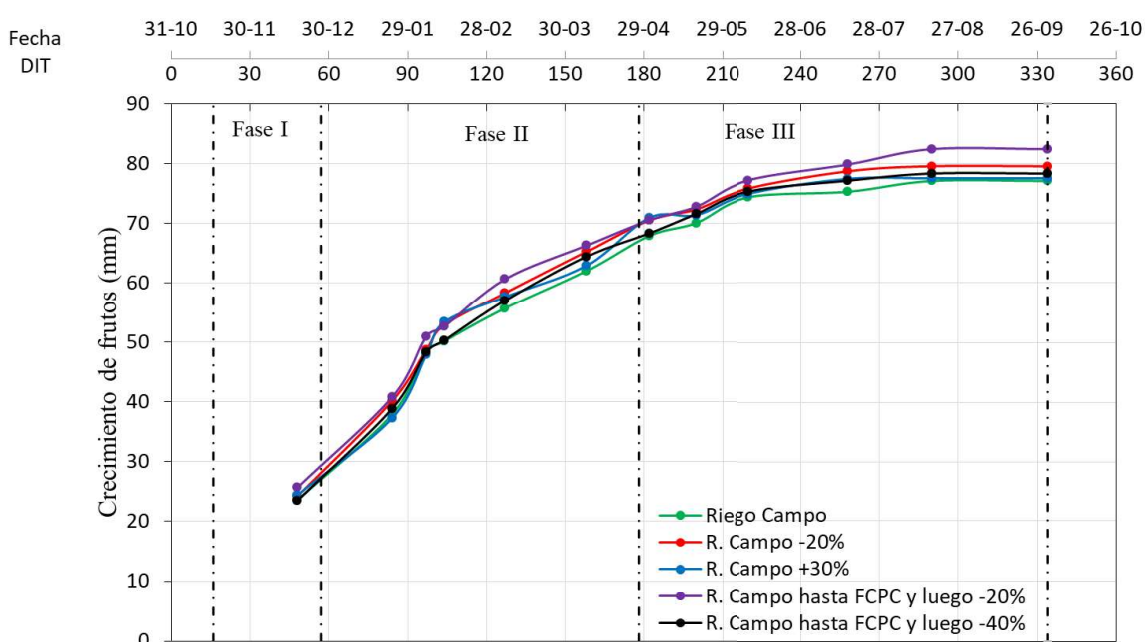




Figura 11b. Curva crecimiento de fruto 2° temporada. Cada punto corresponde al promedio de las repeticiones por tratamiento. A su vez, cada repetición corresponde al promedio de 20 frutos. Líneas verticales segmentadas representan el inicio y término de cada fase de crecimiento.

## Producción

En los siguientes cuadros se presentan variables relacionadas a la producción por cada tratamiento. La carga frutal se separó en frutos por árbol y frutos por  $cm^3$  de copa y se utilizó como covariable para la evaluación de las variables tamaño de fruto, producción y productividad.

Cuadro 9. Significancia estadística para carga frutal, tamaño de fruto, producción y productividad primera temporada.

Fuente de variación	Carga frutal		Tamaño de fruto	Producción	Productividad
	Frutos/árbol	Frutos/ $cm^3$ de copa	Gramos	Kg/árbol	Kg/ $m^3$ de copa
Tratamiento					
R. Campo	773,9±61	11,1±0,6	210,8±7,4	140,8±6,0	2,02±0,10
-20% R. Campo	658,7±61	9,0±1,1	227,3±7,2	156,4±5,9	2,24±0,09
+30% R. Campo	604,9±61	7,7±1,1	231,5±7,4	155,7±6,0	2,20±0,10
R. Campo y -20% F.C.PC	694,2±61	9,9±1,3	228,1±7,0	157,0±5,7	2,25±0,08
R. Campo y -40% F.C.P.C	746,5±61	9,8±0,6	223,3±7,2	150,9±5,8	2,07±0,08
Significancia (p-value)	0,1709	0,0624	0,4221	0,3714	0,1557
Significancia CV (p-value)					
Frutos/árbol				0,0001	
Frutos/ $cm^3$ de copa			0,0009		<0,0001

El cuadro 9 presenta los resultados de producción para la primera temporada del ensayo. Al observar el tamaño de fruto, no se evidencian diferencias estadísticamente significativas. A pesar de esto, se ve que T3 posee el mayor peso de fruto entre los tratamientos, al igual que en la figura 11a, que es la curva que se encuentra más arriba indicando un mayor diámetro al momento de la cosecha.

Si bien, en esta temporada se obtuvieron frutos de mayor tamaño y peso en el tratamiento con más agua aplicada, los resultados de productividad son discrepantes en este aspecto. A pesar de no haber diferencias estadísticas significativas con lo que respecta a la producción y productividad, T4 y T2 son los tratamientos que presentan mayor kg de frutos. Es decir, podría sugerirse en primera instancia que plantas con alta cantidad de agua aplicada generan frutos de mayor tamaño, pero baja productividad. Sin embargo, en ninguna categoría durante esta temporada se observaron diferencias estadísticas significativas, por lo que no se puede asumir que las plantas que recibieron menos agua de riego durante la fase II de crecimiento sufrieron un estrés que se reflejara en los resultados productivos, ni que plantas con mayor cantidad de agua de riego aplicada durante toda la temporada, generan frutos de mayor tamaño y peso.

El cuadro 10 presenta los resultados de producción de la temporada dos; en este caso sí se evidencian diferencias (p-value<0,05) en el peso de los frutos al momento de la cosecha. T1 presenta el mayor promedio de peso de fruto, esto no coincide con la curva de crecimiento de

fruto de la temporada (Figura 11b), en donde T4 posee el mayor diámetro, sin embargo, el peso promedio de fruto de T4 no presenta diferencias estadísticas significativas con T1 y T5.

Cuadro 10. Significancia estadística para carga frutal, tamaño de fruto, producción y productividad segunda temporada.

Fuente de variación	Carga frutal		Tamaño de fruto	Producción	Productividad
	Frutos/árbol	Frutos/cm <sup>3</sup> de copa	Gramos	Kg/árbol	Kg/m <sup>3</sup> de copa
Tratamiento					
R. Campo	357,5±35	5,86±1,1	270±6,3 a	80,0±3,3	1,24±0,03 a
-20% R. Campo	320,0±35	5,31±1,1	260±5,7 b	79,8±3,3	1,20±0,02 a
+30% R. Campo	322,8±81	4,27±1,1	245±5,3 c	78,8±3,3	1,16±0,04 ab
R. Campo y -20% F.C.PC	266,0±81	3,8±1,1	268±8,3 ab	81,6±3,3	1,24±0,04 a
R. Campo y -40% F.C.P.C	311,8±81	4,36±1,1	256±6,1 ac	79,5±3,3	1,14±0,03 b
Significancia (p-value)	0,5751	0,6051	0,0028	0,9661	0,0129
Significancia CV (p-value)					
Frutos/árbol				<0,0001	
Frutos/cm <sup>3</sup> de copa			<0,0001		<0,0001

En la categoría de productividad, nuevamente T1 presenta el valor más alto, sin diferencias estadísticas significativas con T2 y T4, y en producción no existen diferencias estadísticas entre los tratamientos, pero T4 y T1 exponen los valores más altos.

Como se observó en la figura 10, T3 fue el que resultó estar más apegado a la línea de gestión y presentó valores de potencial xilemático óptimos durante toda la temporada (Ortuño, et al., 2006a; Vélez et al., 2007; Pérez-Pérez et al., 2008; Ballester et al., 2013; Gasque et al., 2016), lo que indicó que la línea de gestión es efectiva y no genera estrés en la planta. No obstante, esto no se vio reflejado en los índices de productividad, en donde T3 obtiene los valores más bajos en casi todos los parámetros, y en el caso del peso promedio de fruto y productividad, con diferencias estadísticas significativas (Cuadro 10). Por tanto, para efectos de esta temporada, se podría inferir que la línea de gestión establecida, si bien no genera valores de potencial que indiquen estrés, si generó un efecto en las variables de producción, en donde tratamientos con la cantidad de riego establecido por ésta o con más aplicada, obtuvieron resultados productivos más bajos que tratamientos con menos agua aplicada, lo que indica que el punto de recarga podría establecerse más bajo, permitiéndose así más días entre los riegos, sin tener bajas en la producción.

Cuadro 11. Significancia estadística para carga frutal, tamaño de fruto, producción y productividad tercera temporada.

Fuente de variación	Carga frutal		Tamaño de fruto	Producción	Productividad
	Frutos/árbol	Frutos/cm <sup>3</sup> de copa	Gramos	Kg/árbol	Kg/m <sup>3</sup> de copa
Tratamiento					
R. Campo	378,4±68	4,95±1,1	244±3,9	86,4±1,0	1,05±0,03 b
-20% R. Campo	387,8±28	5,00±0,3	249±3,9	91,4±1,0	1,12±0,03 ab
+30% R. Campo	292,3±68	2,97±1,1	238±18,1	84,2±5,1	1,03±0,03 b
R. Campo y -20% F.C.PC	465,3±68	5,95±1,1	262±4,6	94,1±1,2	1,10±0,02 ab
R. Campo y -40% F.C.P.C	322,1±28	3,54±0,3	255±4,1	93,1±1,1	1,12±0,02 a
Significancia (p-value)	0,2468	0,0469	0,0698	0,0023	0,0597
Significancia CV (p-value)					

Frutos/árbol	<0,0001	<0,0001
Frutos/cm <sup>3</sup> de copa		<0,0001

En relación a la temporada tres, no se presentan diferencias estadísticamente significativas en el tamaño de fruto, puesto que, como se mencionó anteriormente en la figura 10, durante la fase II todos los tratamientos permanecieron en o sobre la línea del punto de recarga, y el potencial xilemático de todos los tratamientos se encuentra cercano a los -1,0 MPa, por lo que no se cumplió el contenido de agua que era esperado en cada tratamiento, y los valores de potencial medidos no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos (Cuadro 8). Todos los tratamientos recibieron una cantidad de agua suficiente como para no generar un estrés por déficit, lo que se ve reflejado en los valores del peso de fruto. A pesar de esto, al observar los promedios de tamaño de fruto de cada tratamiento, los valores más altos son correspondientes a los tratamientos con mayor restricción hídrica durante esta fase.

En la categoría de productividad sí se presentan diferencias estadísticas, siendo T2 y T5 los tratamientos con resultados más altos y T3 el valor más bajo. A pesar de no evidenciar diferencias significativas en lo que respecta a producción (presenta un p-value inferior a 0,05, sin embargo la prueba de comparación múltiple entregó letras iguales para todos los tratamientos) y tamaño de fruto (como se mencionó anteriormente), T3 nuevamente presenta los valores más bajos entre los tratamientos. Esto podría sugerir que los tratamientos que recibieron más agua durante toda la temporada obtuvieron respuestas productivas más bajas, debido a que la cantidad de agua aplicada fue excesiva o muy frecuente y afectó la aireación del suelo, disminuyendo así la conductancia estomática y el intercambio gaseoso (Ortuño et al., 2007).

Las tres temporadas muestran una tendencia a mayor producción y productividad en los tratamientos con menos agua, y dos temporadas presentan frutos de mayor tamaño y peso bajo estas condiciones; en consecuencia, se podría deducir en términos generales, que los tratamientos con menos agua obtienen resultados productivos mayores o iguales que tratamientos con más agua o con el agua óptima aplicada según la línea de gestión. Es decir, a partir de lo observado en este ensayo en particular en las fases II de crecimiento de fruto, es posible restringir más la línea de gestión monitoreando el estado hídrico de la planta, para así obtener valores productivos mejores.

## VARIABLES DE CALIDAD

Los resultados del análisis estadístico realizado a variables de calidad se presentan ordenados por temporadas en el cuadro 12, 13 y 14 que corresponden a la primera, segunda y tercera temporada respectivamente.

Cuadro 12. Significancia estadística para grosor de cáscara, porcentaje de jugo, sólidos solubles, porcentaje de acidez e índice de madurez, primera temporada.

Fuente de variación	Grosor de cáscara	Jugo	Sólidos S.	Acidez	I. Madurez
	%	%	%	%	
Tratamiento					
R. Campo	16,6±0,5	53,45±1	9,31±0,2 b	1,0±0,1	10,4±0,9
-20% R. Campo	16,0±0,5	52,39±1	10,5±0,2 a	1,0±0,1	10,7±0,8
+30% R. Campo	16,4±0,5	50,73±1	9,56±0,2 b	0,9±0,1	10,4±0,6
R. Campo y -20% F.C.P.C	16,7±0,5	50,36±1	9,56±0,2 b	1,0±0,1	10,0±0,4
R. Campo y -40% F.C.P.C	16,7±0,5	52,01±1,42	10,1±0,2 a	1,0±0,1	10,8±0,6
Significancia (p-value)	0,7580	0,3081	0,0004	0,6659	0,4691

Durante la fase III de crecimiento de fruto, cesa la división celular y comienza el aumento de sólidos solubles, degradación de clorofila y disminución de ácidos libres (Duran, 2003 citado en Ferreyra y Selles, 2011). Si bien, en la primera temporada durante la fase III los contenidos de agua de todos los tratamientos (Figura 10) se mantuvieron sobre el punto de recarga constantemente y los valores de potencial se encuentran fuera de los rangos de estrés, el porcentaje de sólidos solubles sí evidencian diferencias estadísticas significativas (Cuadro 12). T2 y T5 presentan los valores más altos con diferencias estadísticas significativas con el resto de los tratamientos, lo que se entiende como que las leves diferencias de agua en esta fase, tuvieron influencia en esta variable.

No existen diferencias ( $p\text{-value} > 0,05$ ) en las variables de acidez e índice de madurez, pero se demuestra una tendencia a mejores valores en tratamientos con menos agua aplicada.

Cuadro 13. Significancia estadística para grosor de cáscara, porcentaje de jugo, sólidos solubles, porcentaje de acidez e índice de madurez, segunda temporada.

Fuente de variación	Grosor de cáscara	Jugo	Sólidos S.	Acidez	I. Madurez
	%	%	%	%	
Tratamiento					
R. Campo	18,7±0,1	43,22±2	9,8±0,3 b	1,0±0,1	9,6±0,4 b
-20% R. Campo	19,1±1,0	42,98±2	10,1±0,3 b	1,0±0,1	10,2±0,4 ab
+30% R. Campo	17,6±0,5	42,68±2	10,0±0,3 b	0,9±0,1	10,0±0,5 ab
R. Campo y -20% F.C.P.C	17,0±1,0	43,75±2	10,3±0,3 ab	1,1±0,1	9,1±0,5 b
R. Campo y -40% F.C.P.C	16,8±0,5	43,09±2	10,9±0,3 a	1,0±0,1	11,4±0,4 a
Significancia (p-value)	0,0200	0,9902	0,0905	0,6161	0,0317

Los resultados de sólidos solubles y acidez en la temporada dos (Cuadro 13) de todos los tratamientos se encuentran dentro de los rangos óptimos de cosecha en naranjos, que corresponden a sobre 9,5°Brix y una acidez sobre 0,8 (FIA, 2009). Con respecto a la acidez, los tratamientos no presentan diferencias estadísticas significativas.

Se observaron diferencias estadísticas significativas en los sólidos solubles en donde T1 y T3 presentan los valores más bajos, siendo estadísticamente iguales entre ellos, y estadísticamente distintos a T5, que presenta el más alto. La mayor acumulación de sólidos solubles en T5 podría estar relacionado con el posible estrés por hipoxia generado por los frecuentes riegos y el bajo porcentaje de PDR, descrito anteriormente (en el ítem de variables fisiológicas). Si se observa nuevamente la figura 10 en la temporada dos, fase III de crecimiento, la curva de variación de contenido de agua de T5 se encuentra más baja que el resto de los tratamientos y a pesar de que los valores de potencial xilemático son similares y no existen diferencias significativas, el hecho de que el contenido de agua fuera menor en comparación al resto de los tratamientos, significaría un suelo más aireado, lo que pudo haber tenido efecto en la acumulación de sólidos solubles.

El índice de madurez en la temporada dos (Cuadro 13) presenta diferencias significativas, en donde T5 obtiene los valores más altos. Nuevamente se evidencia la tendencia a mejores resultados de calidad de fruta en tratamientos con menos agua de lo indicado según la línea de gestión.

Con respecto al grosor de la cáscara de la segunda temporada (Cuadro 13), el análisis de la varianza reveló un  $p\text{-value}$  de 0,02, sin embargo, al realizar la prueba de comparación múltiple LSD de Fisher todos los tratamientos presentaron letras iguales, por lo que no existen diferencias significativas.

En la temporada tres (Cuadro 14), no fue posible realizar el análisis estadístico del porcentaje del grosor de la cáscara, dado que no se midió diámetro de fruto durante toda la temporada por las razones mencionadas anteriormente, por consiguiente, no se pudo realizar la respectiva relación entre el diámetro del fruto y su grosor de cáscara. El resto de las variables no presentan diferencias estadísticas significativas, a excepción del índice de madurez, en donde T1 y T3 tienen los valores más bajos con respecto al resto de los tratamientos.

Cuadro 14. Significancia estadística para grosor de cáscara, porcentaje de jugo, sólidos solubles, porcentaje de acidez e índice de madurez, tercera temporada.

Fuente de variación	Grosor de cáscara	Jugo	Sólidos S.	Acidez	I. Madurez
	%	%	%	%	
Tratamiento					
R. Campo	±	46,19±0,70	10,38±0,23	0,78±0,05	8,10±0,58 b
-20% R. Campo	±	47,38±1,92	10,35±0,23	1,15±0,15	11,86±1,65 a
+30% R. Campo	±	47,13±0,70	10,40±0,23	0,79±0,05	8,22±0,58 b
R. Campo y -20% F.C.P.C	±	46,51±0,70	10,50±0,23	0,88±0,05	9,25±0,58 a
R. Campo y -40% F.C.P.C	±	47,34±0,70	10,88±0,23	0,87±0,05	9,46±0,58 a
Significancia (p-value)		0,6107	0,4968	0,0604	0,0178

Si bien, existen diferencias en las últimas dos temporadas con respecto al índice de madurez, en todas las temporadas y en todos los tratamientos éste se encuentra por sobre el valor óptimo de cosecha, según su especie y variedad. Romero-Rodríguez et al. (2020) indican valores de índice de madurez mínimo comercial para naranjas de 6,5 hasta 14 aproximadamente, a partir de este valor, la fruta comienza a perder su calidad organoléptica. Los valores presentados en los cuadros 12, 13 y 14 van desde 8 a 12 aproximadamente, por lo que se encuentran dentro del rango.

El porcentaje de jugo se define en la fase II del crecimiento de fruto (Orduz-Rodríguez et al., 2009), periodo en el que comienzas las restricciones de agua de T4 y T5; se observan valores más altos de porcentaje de jugo en los tratamientos 1 y 3, lo que se podría interpretar como que plantas regadas a partir de lo establecido por la línea de gestión generan un aumento en el contenido de jugo del fruto. De todos modos, en ninguna temporada se evidenciaron diferencias estadísticas significativas y los valores numéricos son bastante similares entre tratamientos, por tanto lo anterior no es concluyente, y nuevamente se evidencia que no se generó un estrés en las plantas que afectara esta variable. En relación al grosor de la cáscara, tampoco se evidencias estadísticas significativas en las temporadas.

En el caso de los sólidos solubles, se constata una tendencia a adquirir un mayor porcentaje en tratamientos con menos agua aplicada, ya sea durante toda la temporada o después del fin de caída post cuaja. En otras palabras, el déficit hídrico al final de caída de post cuaja generó una acumulación activa de azúcares (Vélez et al., 2007b); por el contrario, T3 en la temporada 2 obtuvo el porcentaje más bajo de sólidos solubles, esto podría reafirmar que un exceso de agua en esta etapa de maduración de fruto puede reducir el contenido de sólidos solubles (Garzón Correa et al., 2013). Además, en la primera temporada, T1 presenta el valor más bajo de sólidos solubles, por lo que finalmente se deduce que aportes de agua inferiores a los establecidos por la línea de gestión podrían repercutir de igual o mejor forma en los porcentajes de sólidos solubles de los frutos y en la calidad del fruto al momento de la cosecha, éstos últimos debido a que esta tendencia se repite en variables como la acidez y el índice de madurez.

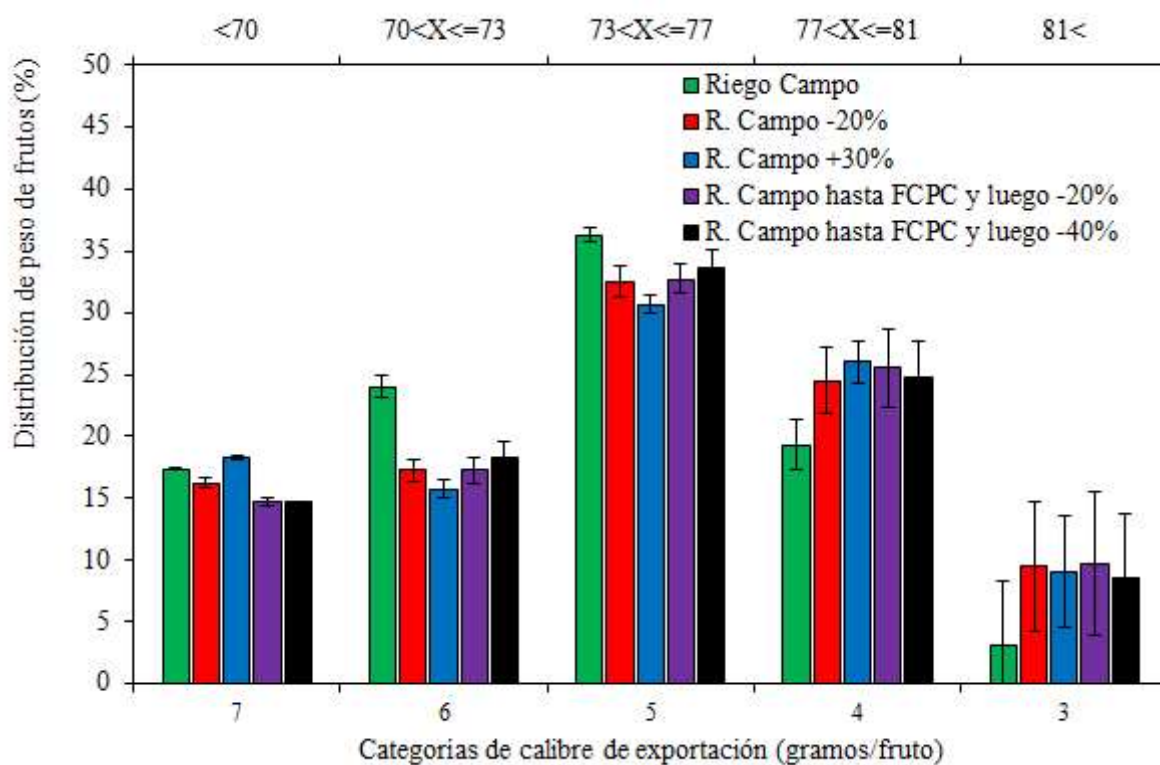


Figura 12a. Distribución de calibres comerciales, temporada 1. La X en el eje de las abscisas superior corresponde al valor que toma el diámetro dentro del rango establecido para la categoría de calibre indicada en el eje de las abscisas inferior (en milímetros).

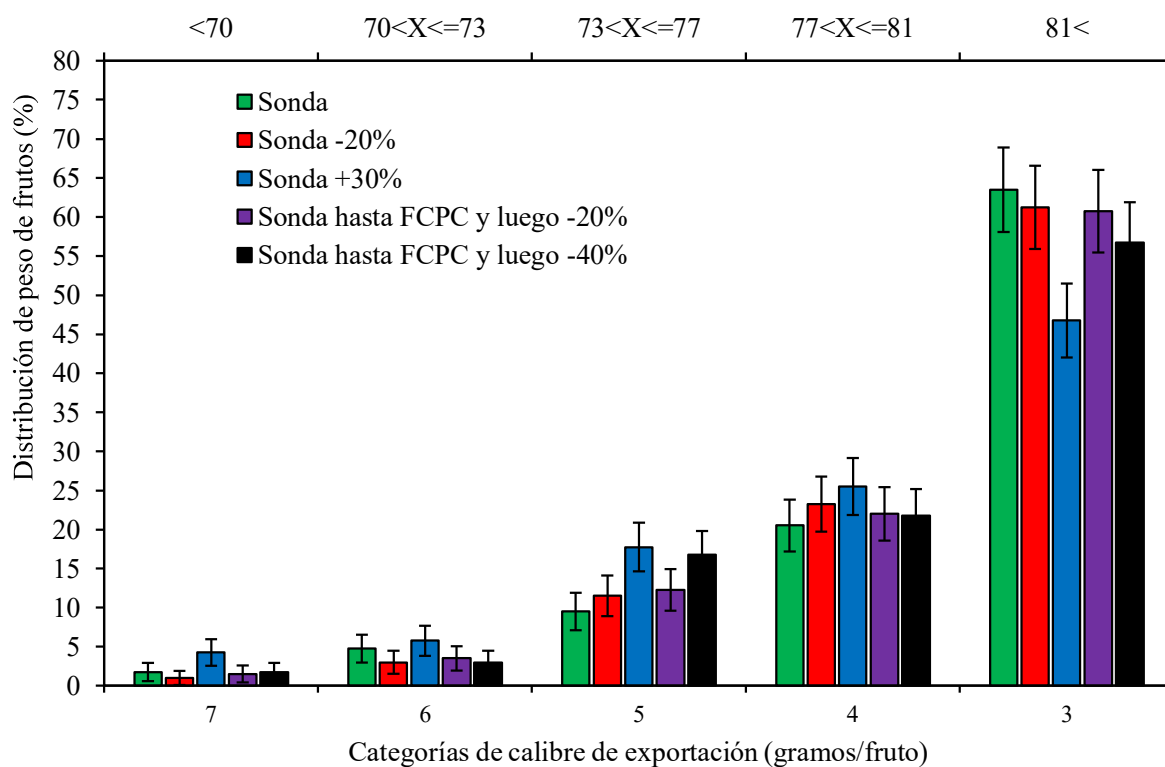


Figura 12b. Distribución de calibres comerciales, temporada 2. La X en el eje de las abscisas superior corresponde al valor que toma el diámetro dentro del rango establecido para la categoría de calibre indicada en el eje de las abscisas inferior (en milímetros).

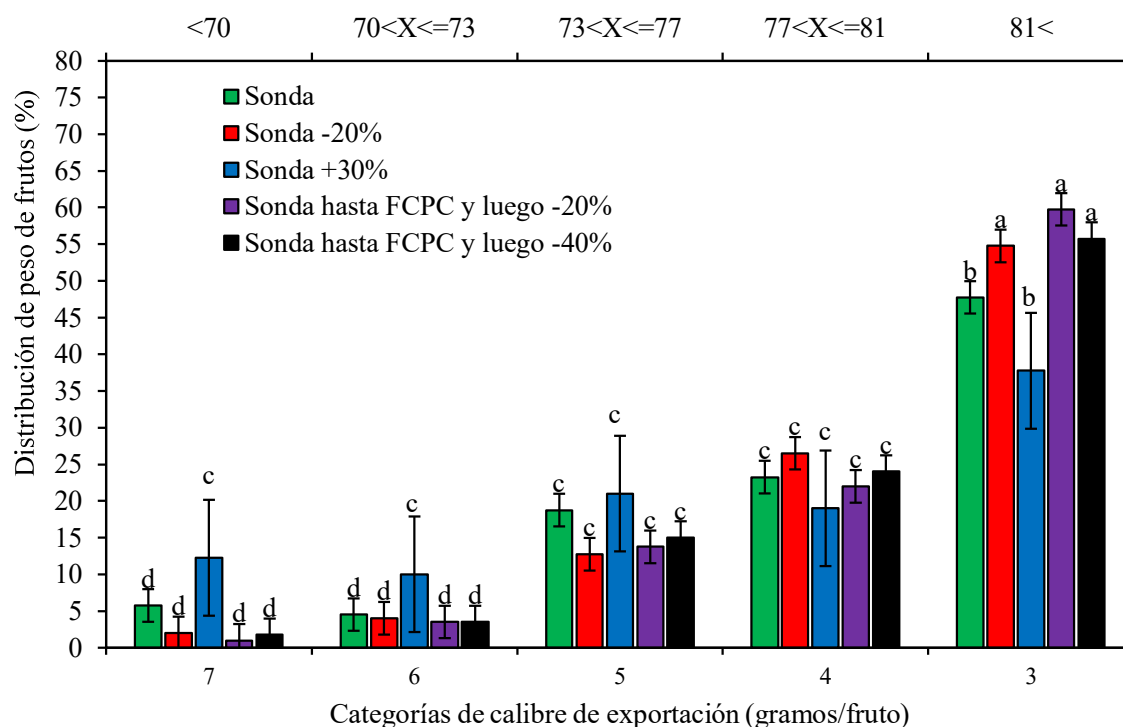


Figura 12c. Distribución de calibres comerciales, temporada 3. La X en el eje de las abscisas superior corresponde al valor que toma el diámetro dentro del rango establecido para la categoría de calibre indicada en el eje de las abscisas inferior (en milímetros).

La distribución de calibres comerciales se observa en la figura 12, aunque no hay diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en las primeras dos temporadas (Figura 12a y 12b), se aprecia que la cantidad de frutos de calibre 3 (81 g<) en la primera temporada es inferior respecto a las otras categorías de calibre y mucho menor que en las dos temporadas que le siguen. Por otro parte, en los resultados de producción de la primera temporada (Cuadro 9) vistos anteriormente, la carga frutal, la producción y la productividad son alrededor del doble que en las otras dos temporadas. Probablemente, hubo un efecto del riego constante y frecuente que generó en todos los tratamientos una mayor cantidad de frutos, pero de menor tamaño.

A pesar de que no se evidencian diferencias estadísticamente significativas en las temporadas 1 y 2 entre los calibres al momento de la cosecha (Figura 12a y 12b), visualmente se puede observar que el tratamiento R. Campo +30% (T3) fue el que obtuvo mayor cantidad de frutos de calibres más pequeños en todas las temporadas, reafirmando así en la tercera temporada (Figura 12c) en la categoría de calibre 3, en donde T3 presenta la menor cantidad de frutos con diámetro mayor a 81 cm con diferencias estadísticas significativas con el resto de los tratamientos, a excepción de T1 con el que son estadísticamente iguales. Además, presenta una mayor cantidad de frutos en las categorías 7 y 6, nuevamente con diferencias estadísticamente significativas. T2, T4 y T5 presentan mayor porcentaje de frutos calibre 3.

Se puede deducir que el regar con menos agua de lo establecido mediante la línea de gestión, no genera un efecto negativo en el desarrollo de la fruta. Con respecto a los resultados de T3,

se podría inferir que la planta se estresó ligeramente al recibir una mayor cantidad de agua, al contrario del resto, lo que deriva no solo en frutos con calibres comerciales pequeños, sino que también en una productividad inferior al resto de los tratamientos (Kolowski, 1997 citado en Ferreyra et al., 2006).

Finalmente, establecer la programación del riego mediante la línea de gestión, podría afectar de manera negativa al calibre comercial del fruto, generando categorías más bajas sin evidenciar estrés hídrico por parte de la planta. Se sugiere, en base a los resultados de este ensayo, que la línea de gestión podría ser más restrictiva, monitoreando la planta con valores de potencial hídrico más bajos de los obtenidos en este ensayo (cerca de  $-1,5$  MPa) y con esto, se mantendrían o mejorarían no solo los calibres comerciales, sino que la producción y la calidad de la fruta.

### Línea Base del cultivo

A partir de los datos de potencial xilemático y déficit de presión de vapor (DPV) obtenidos en las mediciones realizadas para el ensayo, se definió la línea base para el cultivo de naranjo.

Se establecieron las líneas base para cada tratamiento (Figura 13) a partir de todas las mediciones a lo largo de las tres temporadas del ensayo y se hizo un análisis estadístico de comparación de pendientes e interceptos (Cuadro 14). Los resultados no mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, lo cual era posible suponer debido a que visualmente las curvas se encuentran muy juntas, las diferencias estadísticas de mediciones de potencial entre tratamientos por día representaban un bajo porcentaje del total medido y por último, no se evidencian valores de potencial que indiquen estrés para cítricos a lo largo de los tratamientos. Además, si bien hubo diferencias en las variables de producción y de calidad y una tendencia a mejores resultados en tratamientos con menos agua, no es posible establecer una clara relación entre los valores de potencial y estos resultados.

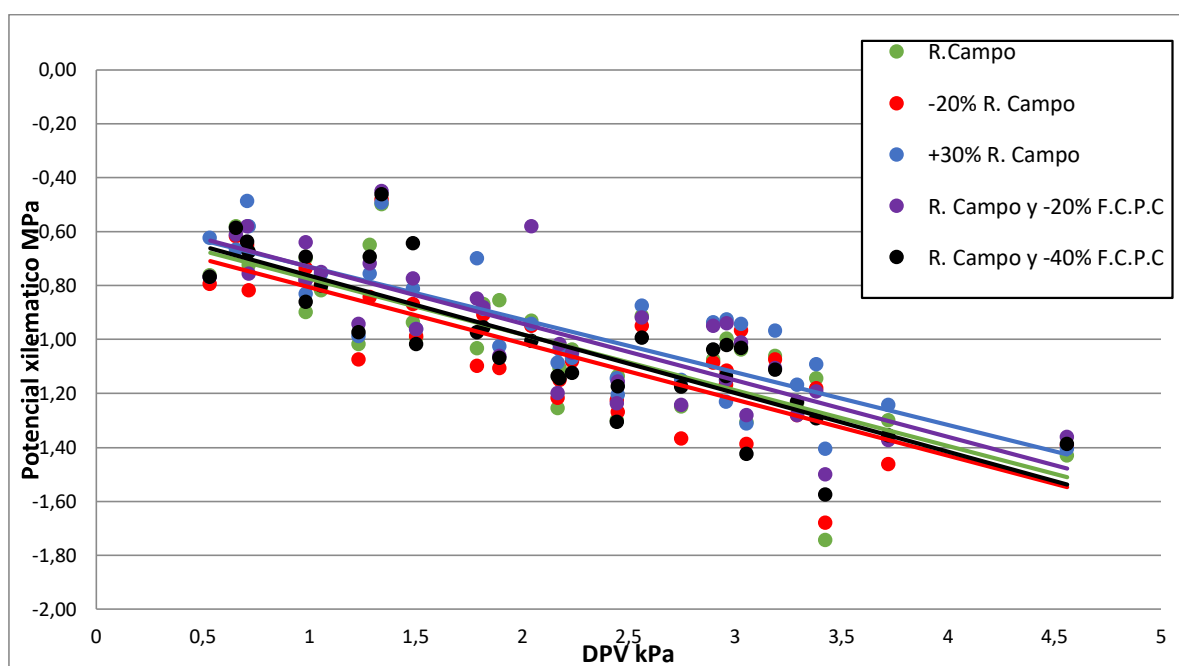


Figura 13. Mediciones de potencial xilemático en función del déficit de presión de vapor (DPV) para cada tratamiento durante las tres temporadas del ensayo. Cada punto corresponde



al promedio de dos mediciones realizadas por repetición y a su vez, al promedio de las repeticiones por tratamiento, en un día. Líneas de colores indican la regresión lineal de cada tratamiento.

Cuadro 15. Análisis estadístico de pendientes e interceptos de cada recta por tratamiento.

Tratamiento	Ecuación	R <sup>2</sup>	Pendiente	Intercepto
R. Campo	$y = -0,2068x - 0,567$	0,6472	-0,2068 a	- 0,5670 a
-20% R. Campo	$y = -0,2084x - 0,5971$	0,6566	-0,2084 a	- 0,5971 a
+30% R. Campo	$y = -0,1958x - 0,5339$	0,6832	-0,1958 a	- 0,5339 a
R. Campo y -20% F.C.P.C	$y = -0,2101x - 0,5202$	0,6714	-0,2101 a	- 0,5202 a
R. Campo y -40% F.C.P.C	$y = -0,2177x - 0,5449$	0,7073	-0,2177 a	- 0,5449 a

Se realizaron nuevas líneas base a partir de los datos de los dos tratamientos que obtuvieron las mejores respuestas productivas en cada temporada (Figura 14), es decir, para la temporada uno, el primer tratamiento con mejores resultados de productividad fue T4, seguido por T2 (sin diferencias estadísticas significativas). En la segunda temporada, la mejor respuesta productiva fue de T4 nuevamente, sin diferencias con T1 y T2, pero si con el resto de los tratamientos, sin embargo, T1 obtuvo un mayor valor que T2. En el caso de la tercera temporada, T5 y T2 obtienen los valores más altos de productividad. El conjunto de datos para realizar estas líneas base se resume en el siguiente cuadro:

Cuadro 16. Resumen de mejores tratamientos productivos por recta (Línea base), indicando tratamiento por temporada y productividad obtenida.

	Temporada 1	Temporada 2	Temporada 3
Línea base		Productividad Kg/m <sup>3</sup> de copa	
T4 + T4 + T5	R. Campo y -20% F.C.P.C 2,25	R. Campo y -20% F.C.P.C 1,24	R. Campo y -40% F.C.P.C 1,12
T2 + T1 + T2	-20% R. Campo 2,24	R. Campo 1,24	-20% R. Campo 1,12

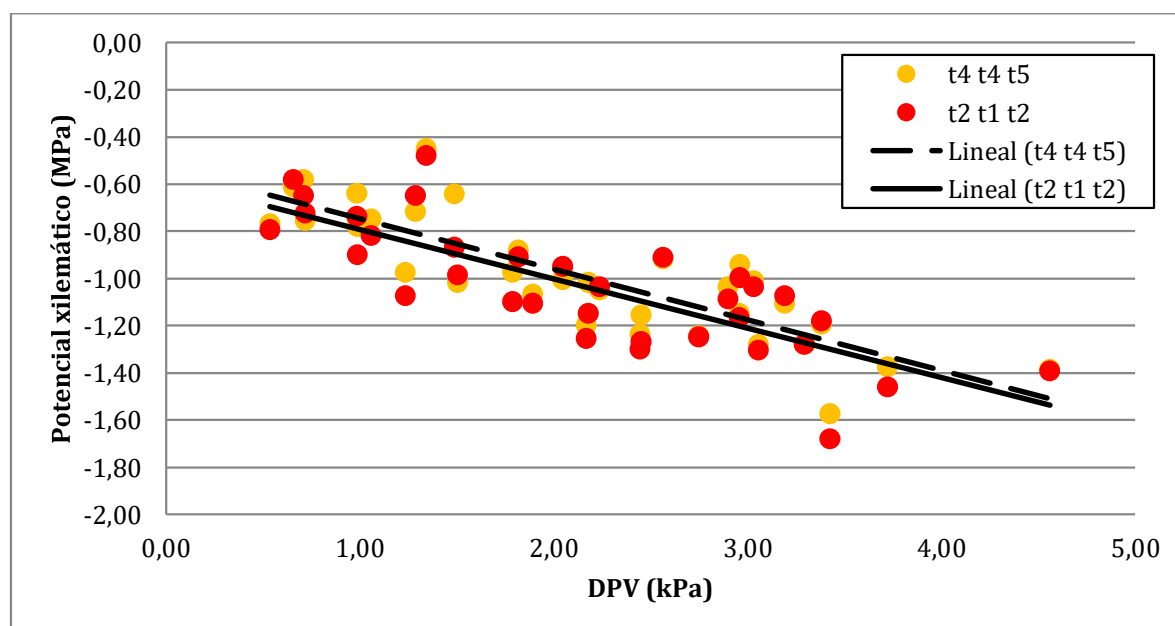


Figura 14. Mediciones de potencial xilemático vs. Déficit de presión de vapor (DPV). Puntos amarillos corresponden a los valores promedios de potencial de los tres tratamientos con mejores resultados productivos: T4, T4 y T5, para la temporada 1, 2 y 3, respectivamente.

Puntos rojos corresponden a los valores promedios de potencial de los segundos tratamientos con mejores resultados productivos: T2, T1 y T2 para la temporada 1, 2 y 3, respectivamente. Línea punteada, representa la regresión lineal de puntos amarillos, y línea continua la de puntos rojos.

Cuadro 17. Análisis estadístico de pendientes e interceptos de cada recta de mejores tratamientos.

Tratamiento	Ecuación	$R^2$	Pendiente	Intercepto
T4 + T4 + T5	$y = -0,2144x - 0,5315$	0,7	-0,2144 a	- 0,5315 a
T2 + T1 + T2	$y = -0,209x - 0,5842$	0,6405	-0,2090 a	- 0,5842 a

Nuevamente, no se identificaron diferencias estadísticas significativas en las pendientes y en los interceptos de las rectas (Cuadro 17). Frente a esto, se optó por realizar una sola recta con todos los datos de los dos mejores tratamientos de todas las temporadas (Figura 15). Esta consiste en la línea base para el cultivo de naranjo bajo condiciones no limitantes de agua (non-stressed) (McCuthan Y Shackel 1992).

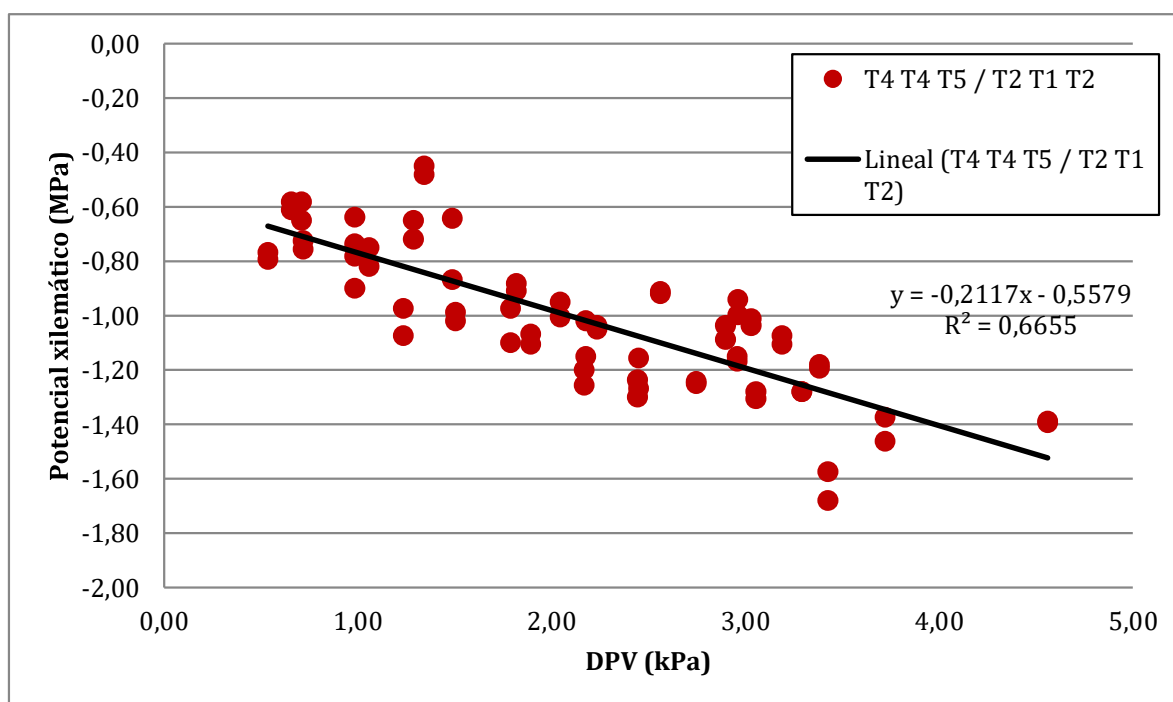


Figura 15. Línea base para cultivo de naranjo var. Lane Late, sin limitaciones hídricas.

Esta línea muestra la misma tendencia que líneas bases en otras especies, en donde valores más altos de potencial (cerca de cero) se relacionan con valores más bajos de DPV, disminuyendo a medida que el DPV aumenta (McCuthan y Shackel, 1992; Shackel et al., 2021). Si bien, el estudio de Ortuño et al. (2006b) en limoneros (*Citrus limon* (L.) Burm. fil.) injertados sobre naranjo (*C. aurantium* L.) presenta una línea base en donde la pendiente es superior por 0,5 y el intercepto inferior por 0,32 a la establecida en este estudio, el rango de valores que abarca el potencial son similares.

No se han encontrado autores que describan una línea base para naranjos, por lo que resulta interesante establecer ésta a partir de los datos recopilados en el estudio. Al generarla a partir de tratamientos, en su mayoría, con menor agua aplicada de lo que indica la línea de gestión y respaldada por respuestas productivas, podría ser un buen indicador para la programación de

riego y/o para validar el uso de líneas de gestión para este cultivo y para otros con condiciones climáticas similares.

A partir de la ecuación de la recta de la línea base, es que se genera el siguiente cuadro con el fin de establecer valores de potencial xilemático a distintas temperaturas y humedades relativas, para el cultivo de naranjo (*Citrus sinensis* (L) var. Lane Late):

Cuadro 18. Planilla de potencial xilemático en función de la humedad relativa (%) y la temperatura (°C) para cultivo de naranajo “Lane Late”

Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)									
	16	18	20	23	25	27	30	33	35	37
5	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,6	-1,7	-1,8
10	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,2	-1,4	-1,5	-1,6	-1,8
15	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,6	-1,7
20	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
25	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,5	-1,6
30	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5
35	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,3	-1,3	-1,4
40	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4
45	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,2

Este cuadro, entrega valores referenciales a temperaturas y humedades relativas, de manera de hacer más amigable el uso de la línea base para la programación de riego en campo. Cabe recordar, que estos valores de potencial deben ser interpretados para días soleados y despejados, ya que en días nublados el potencial tiende a bajar, pudiendo obtener valores más negativos y sugiriendo así, condiciones de estrés, sin que la planta este estresada.

## CONCLUSIONES

La programación de riego en naranjos utilizando líneas de gestión, a través de la interpretación de curvas de extracción de agua en el suelo es un criterio práctico y funcional, pero deben ser validadas con mediciones de potencial xilemático, que permitan precisar de mejor manera el punto de recarga, optimizando así el riego y generando mejores resultados productivos, por lo que para fines de este ensayo, se acepta la hipótesis planteada.

No fue posible establecer una relación clara entre restricciones hídricas y valores de potencial xilemático que indiquen un estrés, debido a que el manejo de los tratamientos de riego establecidos no fue efectivo en su totalidad y las mediciones de potencial resultaron todas dentro de los rangos óptimos descritos por otros autores. No obstante, si se evidenció una tendencia clara a mejores resultados productivos y de calidad de fruto en tratamientos con menos agua aplicada de lo que indica la línea de gestión, lo que sugiere que el naranjo podría tolerar niveles de punto de recarga más bajos que lo establecido mediante las curvas de extracción de agua.

Como los resultados de producción y calidad tienden a ser mejores en tratamientos con menos agua pero con valores de potencial dentro de los rangos descritos como óptimos, se infiere que el naranjo var. Lane Late podría tolerar valores de potencial inferiores a  $-1,3$  MPa y se sugieren valores superiores a  $-1,5$  MPa como indicador de estrés (este último no se puede determinar con los datos obtenidos a partir de este ensayo). Para confirmar esto, resulta importante determinar una línea base para el cultivo de naranjo con limitaciones de agua, de manera de obtener el valor mínimo al que puede llegar el potencial xilemático sin causar repercusiones negativas en la producción o calidad del fruto.

La línea base establecida para efectos de este ensayo corresponde a una línea descrita como non-stressed para el cultivo de naranjo, es decir, sin limitaciones de agua, debido a que las restricciones de agua que se esperaban aplicar no fueron en su totalidad efectivas. Esta línea es una referencia importante para interpretar correctamente las mediciones de potencial xilemático en el cultivo de naranjo al momento de usarla para la programación de riego, ya que está asociada a la demanda atmosférica. Por lo mismo, las mediciones de potencial xilemático deben ser realizadas según el protocolo para obtener datos confiables.

#### LITERATURA CITADA

Allen, R., L. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, 56. 322 p.

Ballester, C., J. Castel, D. S. Intrigliolo & J. R. Castel. 2013. Response of Navel Lane Late citrus trees to regulated deficit irrigation: yield components and fruit composition. *Irrigation Science*, 31: 333-341.

Beretta, A. N., A. Silbermann, L. Paladino, D. Torres, D. Bassahun, R. Musselli and A. García-Lamohte. 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e investigación agraria*, 41:263-271.

Beyá-Marshall, V. y M. Galleguillos. 2020. Optimización del riego en paltos y cítricos. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Beyá-Marshall, V., E. Arcos, O. Seguel, M. Galleguillos and C. Kremer. 2022. Optimal irrigation management for avocado (cv.'Hass') trees by monitoring soil water content and plant water status. *Agricultural Water Management*, 271, 107794.

Callejas R. H., J. Navarrete y M. Rioseco. 2013. Líneas de gestión del riego: Umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia. *Antumapu Profesional*, 2(3): 1-17.

CDTEC. 2020. CDTEC productos, Sondas Sentek. Consultora Diestre Tecnología SpA gestión de riego. Santiago, Chile. Disponible en <https://www.cdtec.cl/productos/> (Consultado en Febrero 2021).

CIREN. 1996. Estudio agrológico VI región. Descripciones de suelo, materiales y símbolos. 114. Chile. Centro de información de recursos naturales. 484 p.

CIREN. 2018. Catastro Frutícola. Principales resultados Región de O'Higgins. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Santiago, Chile. 54p.

Cohen, J. D. Goldhamer, E. Fereres, J. Girona and M. Mata. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76(1): 55-60.

Comisión Nacional de Riego (CNR), Chile. 2004. El cultivo de los cítricos: proyecto de validación y transferencia en tecnología de riego y alternativas productivas en áreas regadas. Provaltt-Quillota. INIA. 7 p.

Dexter, A. 1998. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11: 199-238.

Evet, S. and P. Cepuder. 2008. Capacitance sensors for use in access tubes. Pp. 73-90. In: *Field Estimation of Soil Water Content A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology*. Training Course Series 30. International Atomic Energy Agency, Soil and Water Management and Crop Nutrition Section. Vienna, Austria. 131 p.

Ferreya, R. y G. Selles. 2011. Algunas consideraciones para el manejo de riego en cítricos. *Tierra Adentro*, 94: 66-74. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/5246> (Consultado: 24 mayo 2021).

Ferreya, R., G. Sellés y I. Sellés. 2001. Riego deficitario controlado en olivos. Estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. *Boletín Técnico*. N° 59) INIA Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. 48 p.

Ferreya, R., G. Sellés, H. Silva, R. Ahumada, I. Muñoz y V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(7): 1109-1118.

Fundación para innovación agraria (FIA). 2009. Resultados y Lecciones en Producción de Nuevas Variedades y Portainjertos de Cítricos. Proyectos de Innovación en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. 50p.

Gálvez, R., R. Callejas, G. Reginato y M.C. Peppi. 2015. Irrigation schedule on table grapes by stem water potential and vapor pressure deficit allows to optimize Water Use. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 29(2) 60-70.

García I., J.A. Jiménez, J.L. Muriel, F. Perea y K. Vanderlinden. 2005. Evaluación de sondas de capacitancia para el seguimiento de la humedad de un suelo arcilloso bajo distintas condiciones y tipos de manejo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 7: 101-107.

García González, M., Y. Carvajal Escobar y H. Jiménez. 2011. La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y competitividad*, 9(1): 19 - 29.

- Garzón Correa D., J. Vélez-Sánchez y J. Orduz Rodríguez. 2013. Efecto del déficit hídrico en el crecimiento y desarrollo de frutos de naranja Valencia (*Citrus sinensis* Osbeck) en el piedemonte del Meta, Colombia. *Acta Agronómica*, 62(2):136-147. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169929772008>. (Consultado en Marzo de 2022).
- Gasque, M., P. Martí, B. Granero y P. González-Altozano. 2016. Effects of long-term summer deficit irrigation on 'Navelina' citrus trees. *Agricultural Water Management*. 169: 140–147.
- Gatea Al-Shammary A., A. Z. Kouzani, A. Kaynak, S. Y. Khoo, M. Norton and W. Gates. 2018. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. *Pedosphere*, 28: 581-596.
- Ginestar, C. and J.R. Castel. 1996. Responses of young clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 71, 551–559.
- Hadjigeorgalis, E. 2004. Comerciando con incertidumbre: Los mercados de agua en la agricultura chilena. *Cuadernos de Economía* 41: 3-34.
- Hussein-Mounzer, O., J. Mendoza-Hernández, I. Abrisqueta-Villena, L. Tapia-Vargas, J. Abrisqueta-García, J. Vera-Muñoz y M. Ruiz-Sánchez. 2008. Contenido de agua del suelo medido con sondas FDR y umbrales para manejo de riego por goteo en Durazno. *Agricultura Técnica en México*, 34(3): 313-322.
- Irigoyen, A., E. Suero y J. Gardiol. 1998. La precipitación efectiva como componente del balance de agua en un Paleudol Petrocálcico de Balcarce: Eventos de precipitación simulada. Brasilia, Brasil. X Congreso Brasileiro de Meteorologia y VIII Congreso da Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorologia. 5p.
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55: 2427–2436.
- Lorenzo, P. y M. Sánchez-Guerrero. 2008. Equilibrio hídrico en el sistema sustrato-planta-atmosfera. pp 11-27. In: Medrano, E., M. Sánchez-Guerrero, P. Lorenzo y F. Alonso (Eds.). *Relaciones hídricas y programación de riego en cultivos hortícolas en sustratos*. Andalucía, España: IFAPA. 90 p.
- Martínez-Austria, P. y C. Patiño-Gómez. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1): 5-20.
- McCutchan, H. y K. Shackel. 1992. SWP as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117:607-611.
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbó y J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, 43: 63-84
- Mitchan, E. 2007. Pressure bomb use in pears. Disponible en: <http://ucmanagedrought.ucdavis.edu/PDF/PEAR%20PRESSURE%20BOMB.pdf> (Consultado en Octubre 2022).

Mounzer, O. H., J. Vera, L. M. Tapia, Y. García-Orellana, W. Conejero, I. Abrisqueta, M. C. Ruiz-Sánchez and J.M. Abrisqueta-García. 2008. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia*, 42(8): 857-868.

Naor, A. 2000. Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Horticulturae*, 537: 447-454.

Naor, A. 2006. Irrigation Scheduling and Evaluation of Tree Water Status in Deciduous Orchards. p. 111-165. In: *Horticultural Reviews*. Vol. 32. John Wiley y Sons, Inc. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos.

Ordúz-Rodríguez, J. O., H. Monroy, G. Fischer y A. Herrera. 2009. Crecimiento y desarrollo del fruto de mandarina (*Citrus reticulata*) 'Arrayana' en condiciones del piedemonte del Meta, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2): 149-160.

Ortuño, M.F., Y. García-Orellana, W. Conejero, M.C. Ruiz-Sánchez, J.J. Alarcón and A. Torrecillas. 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Tree*, 20: 1-8.

Ortuño, M.F., Y. García-Orellana, W. Conejero, M.C. Ruiz-Sánchez, O. Mounzer, J.J. Alarcón and A. Torrecillas. 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil*, 279: 229-242.

Ortuño, M., J. Alarcón, E. Nicolás y A. Torrecillas. 2007. Water status indicators of lemon trees in response to flooding and recovery. *Biologia plantarum*, 51(2): 292-296.

Pérez-Pérez, J.G., P. Romero and J.M. Navarro. 2008. Response of sweet orange cv Lane late to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. *Irrigation Science*, 26: 415-425.

Reglamento (CE) n° 1799/2001 de la Comisión, de 12 de septiembre de 2001, por el que se establecen las normas de comercialización de los cítricos. *Diario oficial de la Unión Europea*: Luxemburgo, 2001. 7 p. Disponible en: <[http://data.europa.eu/eli/reg/2001/1799/oj\[legislation\]](http://data.europa.eu/eli/reg/2001/1799/oj[legislation])>

Rivera, D., J. Arumí y E. Holzapfel. 2007. Efecto de la red de canales y sistemas de riego en la hidrología del valle de Peumo, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 22(4): 115-119.

Romero-Rodríguez, E., A. Hervalejo, R. Calero-Velázquez y F.J. Arenas-Arenas. 2020. Determinación de la Calidad de los Frutos Cítricos en Laboratorio. Alcalá del Río, Sevilla: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). 1-18 p. <En línea>

Santana, M., L. DA S. Souza, L. Souza and L. Fontes. 2006. Soil physical attributes and citrus root system distribution as indicators of cohesive layers in soils of coastal table lands in the state of Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30: 1-12.

Santibáñez, F., P. Santibáñez y P. González. 2016. El cambio climático y los recursos hídricos en Chile. pp. 147-178. En: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Eds). Agricultura chilena. Reflexiones y desafíos al 2030. Santiago Chile: ODEPA.

Santibáñez, F. y Uribe, J. 1993. Atlas agroclimático de Chile: regiones sexta, séptima, octava y novena. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Agroclimatología, Departamento de Ingeniería en Suelos. 65 p.

Selles, G., R. Ferreyra y P. Maldonado. 2002. Cámara de presión: instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. Aconex N° 76: 18-22.

Sellés, G. y R. Ferreyra. 2006. Sistema monitoreo de planta. pp. 265-286. En: Maldonado, I. y S. Aravena (Eds). Redes de estaciones meteorológicas automáticas y sus aplicaciones productivas. Boletín INIA N° 145. Chillán, Chile.

Sentek Pty. 2018. Diviner 2000. Guía del usuario. Versión 1.5

Shackel K., H. Ahmadi, W. Biasi, R. Buchner, D. Goldhamer, S. Gurusinghe, J. Hasey, D. Kester, B. Krueger, B. Lampinen, G. McGourty, W. Micke, E. Mitcham, B. Olson, K. Pelletrau, H. Philips, D. Ramos, L. Schwankl, S. Sibbett, R. Snyder, S. Southwick, M. Stevenson, M. Thorpe, S. Weinbaum, J. Yeager. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. HortTechnology, 7(1): 23-29.

Shackel, K. 2007. Water relations of woody perennial plant species. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 41(3): 121-129.

Shackel, K., A. Moriana, G. Marino, M. Corell, D. Pérez-López, M.J. Martin-Palomo, T. Caruso, F.P. Marra, L.M. Agüero-Alcaras, L. Milliron, R. Rosecrance, A. Fulton and P. Searles. 2021. Establishing a reference baseline for midday stem water potential in olive and its use for plant-based irrigation management. Front. Plant Sci. 12, 791711

Silva, P., H. Silva, M. Garrido y E. Acevedo. 2015. Manual de estudios y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 85 p.

Tamara, L.A. y J. Ducuara. 2016. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Informe de Facultad de Educación y Ciencias, Universidad de Sucre. Sucre, Colombia. 7 p.

Thompson, R., M. Gallardo, L. Valdez y M. Fernández. 2007. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. Agricultural Water Manage. 92: 13-28

Turrel, F.M. 1961. Growth and photosynthesis area of citrus. Bot. Gaz, 122:284-298

Valenzuela, H. 2011. Caracterización del potencial hídrico xilemático a mediodía en diez especies frutales. 37 p. Tesis pregrado. Universidad de Chile, Facultad de ciencias agronómicas, Santiago, Chile.

Van Veenhuizen. 2000. Revisión de Bases Técnicas. pp. 6-23. En: Miembros de la Red de Cooperación Técnica en Zonas Áridas y Semiáridas. Manual de capacitación y



aprovechamiento del agua de lluvia: Experiencias en América Latina. Serie: zonas áridas y semiáridas N°13. Santiago, Chile: FAO. 235 p.

Vélez, J., D. Intrigliolo y J. Castel. 2007a. Programación del riego deficitario en Clementina de Nules, mediante dendrómetros. *Revista Internacional de Cítricos*, 387: 313-317.

Vélez, J., D. Intrigliolo y J. Castel. 2007b. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural water management*, 90: 197-204.

Vera, J., J. Abrisqueta, R. Quezada, J. Munguía, R. Callejas, R. Gálvez, I. Abrisqueta y M. RuizSánchez. 2010. Calibración de sondas capacitivas para estimar la humedad del suelo en condiciones de campo: efecto de la pedregosidad. 69-71 p. Memoria Resúmenes Extendidos. Primer Congreso Boliviano del Riego y Drenaje. 12 al 14 de julio del 2010 La Paz, Bolivia. Edición B. Moises Quiroga Sossa IIAREN-UMSA.

Williams, L.E., P. Baeza y P. Vaughn. 2012. Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson Seedless grapevines. *Irrigation Science*, 30: 201–212.

Zotarelli, L., Y. Dukes y T. Morgan. 2013. Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. *The Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS)*, 2-5.