



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL AVELLANO EUROPEO (*Corylus avellana* L.) MEDIANTE EL USO DE SENSORES DE FLUJO DE SAVIA Y MEDICIONES DE POTENCIAL HÍDRICO DE TALLO

CHARACTERIZATION OF THE EUROPEAN HAZELNUT (*Corylus avellana* L.) WATER DEMAND THROUGH THE USE OF SAP FLOW SENSORS AND STEM WATER POTENTIAL MEASUREMENTS

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

ANDRÉS JAVIER BECERRA LEÓN

Guía de Tesis

Dr. Julio Haberland Arellanos

Dr. Marco Garrido Salinas

Profesores consejeros

Dr. Cristian Kremer Fariña

Dr. Rodrigo Callejas Rodríguez

SANTIAGO, CHILE

2022

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

**CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL AVELLANO
EUROPEO (*Corylus avellana* L.) MEDIANTE EL USO DE SENSORES DE
FLUJO DE SAVIA Y MEDICIONES DE POTENCIAL HÍDRICO DE
TALLO**

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.

ANDRÉS JAVIER BECERRA LEÓN

	Calificaciones
GUIA DE TESIS	
Julio Haberland Arellanos Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	7.0
Marco Garrido Salinas Ingeniero Agrónomo, Dr.	7.0
PROFESORES CONSEJEROS	
Cristian Kremer Fariña Ingeniero/a Agrónomo, Ph.D.	7.0
Rodrigo Callejas Rodríguez Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	6.4

Santiago, Chile
2022

AGRADECIMIENTOS

Finalizar la tesis es algo que todo estudiante universitario anhela, requiere de esfuerzo y dedicación. Ir a tomar mediciones a terreno siempre es un desafío, sobre todo cuando las cosas no salen como se planean. Quiero partir con una frase que me sirvió en esos momentos:

“Enamórate de los procesos y no de los resultados”

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Elena, quien es una mujer luchadora que ha salido adelante en la vida, ella me inculcó la importancia de priorizar los estudios y puso sus esfuerzos en darme la mejor educación posible.

A mis profesores guías que siempre tuvieron disposición a reunirse incluso en horarios fuera de la jornada laboral, quienes con sus correcciones permitieron dar forma a esta tesis.

A las amistades que formé durante la carrera particularmente a Nayarette y Juan, excelentes amigos y compañeros. También a mi equipo querido “Voleibol Antumapu” donde conocí a grandes personas y compartimos memorables momentos dentro y fuera de la cancha. También reconocer a Ricardo compañero de equipo y ayudante quien no dudó en prestarme apoyo en el desarrollo de la tesis y fue quien me dijo la frase citada al comienzo.

A Catalina, mi polola quien con cariño me ha apoyado sobre todo en los momentos más estresantes.

A Maximiliano, amigos desde el colegio, con quien compartimos largas conversaciones de los más variados temas.

A mi familia, a mi abuela que ya no está con nosotros, quien al igual que mi madre siempre decía que los estudios eran lo primero. A mi abuelo, un hombre de campo por quien probablemente me decidí a estudiar esta carrera.

Finalmente agradecer a Storck Chile SPA. y Haberland SPA. por financiar esta tesis y poner a disposición lo necesario para que esta llegara a término.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
MATERIALES Y MÉTODOS	4
UBICACIÓN DEL ESTUDIO.....	4
MATERIAL BIOLÓGICO.....	5
TRATAMIENTOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL	5
MANEJO DEL EXPERIMENTO	6
VARIABLES MEDIDAS	6
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	10
RESULTADOS.....	11
DATOS METEOROLÓGICOS	11
TRANSPIRACIÓN EN BASE A SENSORES DE FLUJO DE SAVIA.....	12
MEDICIONES DE POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO	12
RELACIÓN ENTRE EL POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO Y DPV	14
DENSIDAD DE FLUJO DE SAVIA	14
COEFICIENTES BASALES DE CULTIVO.....	17
RENDIMIENTO Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO	18
DISCUSIÓN	20
TRANSPIRACIÓN EN BASE A SENSORES DE FLUJO DE SAVIA.....	20
POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO COMO INDICADOR DEL NIVEL DE ESTRÉS	20
RELACIÓN ENTRE EL POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO Y DPV	21
DENSIDAD DE FLUJO DE SAVIA	21
COEFICIENTES BASALES DE CULTIVO.....	22
RENDIMIENTO Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO	22
CONCLUSIONES.....	24
LITERATURA CITADA	25

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Efecto de distintos tratamientos de riego sobre la densidad de flujo de savia durante la temporada.....	15
Cuadro 2. Efecto de distintos tratamientos de riego sobre el rendimiento, fruta caída al momento de la cosecha, masa cascara y semilla, diámetro de avellana y semilla, altura de avellana y semilla, número de avellanas por árbol y el % de avellanas sin semillas.....	19
Cuadro 3. Descripción de suelo del sitio de estudio.....	30
Cuadro 4. Propiedades Físicas de suelo.....	30
Cuadro 5. Coeficientes de corrección por efecto de la herida.....	31
Cuadro 6. Propiedades de la madera.....	32
Cuadro 7. Diámetro de fustes y área de albura total de unidades observacionales son sensores de flujo de savia.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.....	4
Figura 2. Diseño experimental.....	5
Figura 3. Evapotranspiración de referencia, precipitaciones diarias, temperatura y humedad relativa temporada 2021/2022	11
Figura 4. Transpiración calculada en base a sensores de flujo de savia.....	12
Figura 5. Mediciones de potencial hídrico xilemático a medio día solar.....	13
Figura 6. Relación entre potencial hídrico xilemático y DPV.....	14
Figura 7. Densidad de flujo de savia un día antes, durante y después del riego durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo	16
Figura 8. Relación entre densidad de flujo de savia y DPV entre las 6:00 h y 21:00 h.....	17
Figura 9. Coeficientes basales de cultivo en base a flujo de savia y f_c y $f_{c\text{ eff}}$	18
Figura 10. Relación entre el área de albura conductora y el diámetro promedio de tronco.....	33
Figura 11. Distribución del bulbo de mojamiento (03/02/2022) para el T50.....	34
Figura 12. Distribución del bulbo de mojamiento (03/02/2022) para el T100.....	35
Figura 13. Distribución del bulbo de mojamiento (03/02/2022) para el T150.....	36

ANEXOS

Anexo 1: Descripción y propiedades físicas de suelo del sitio de estudio	30
Anexo 2: Coeficientes de corrección por efecto de la herida	31
Anexo 3: Propiedades de la madera	32
Anexo 4: Distribución bulbos de mojamiento	34

RESUMEN

El cultivo de *Corylus avellana* (L.) en Chile ha aumentado en la última década, pero la información sobre su manejo hídrico es limitada. Con el objetivo de caracterizar la demanda hídrica del avellano europeo (var. “Tonda di Giffoni”), se realizó un ensayo con un tratamiento bien regado (T100), y dos tratamientos de riego, 50% y 150% de reposición del riego del T100 (T50 y T150 respectivamente) sobre un huerto ubicado en la Región del Maule. Se midió coeficiente basal de cultivo mediante sensores de flujo de savia ($K_{cb\ sap}$) y mediante el método FAO-56 ($K_{cb\ fc}$). Adicionalmente se estableció una línea base para el control de la condición hídrica del cultivo relacionando el potencial hídrico de tallo al déficit de presión de vapor (DPV). Se observó que $K_{cb\ fc}$ es una opción simple y económica en condiciones óptimas de agua con medias entre 0.69 y 0.76. El uso de $K_{cb\ sap}$ permitió ajustar el K_{cb} a condiciones limitantes de agua. Se observó la sensibilidad del avellano al DPV mostrando el comienzo del control estomático a 1.46 kPa, acentuándose entre 2.2 y 2.6 kPa. Los tratamientos no afectaron el rendimiento, pero sí redujeron el diámetro de avellanas y semillas del T50.

Palabras claves: Coeficiente dual de cultivo, coeficiente basal de cultivo, evapotranspiración, método de la relación de calor, riego deficitario.

ABSTRACT

The planted area with *Corylus avellana* (L.) in Chile has increased in the last decade, but information on its water management is limited. In order to characterize the water demand of the European hazelnut (var. “Tonda di Giffoni”), an experiment was carried out with a well-irrigated treatment (T100), and two irrigation treatments, 50% and 150% replacement of irrigation of the T100 (T50 and T150 respectively) on an orchard located in the Maule Region. Basal crop coefficient was measured using sap flow sensors ($K_{cb\ sap}$) and the FAO-56 method ($K_{cb\ fc}$). Additionally, a baseline was established for the control of the water condition of the crop, relating the stem water potential to the vapor pressure deficit (DPV). It was observed that $K_{cb\ fc}$ is a simple and economical option in optimal water conditions with means between 0.69 and 0.76. The use of $K_{cb\ sap}$ allowed adjusting the K_{cb} to limiting water conditions. The sensitivity of hazelnut to DPV was observed, showing the beginning of stomatal control at 1.46 kPa, accentuating between 2.2 and 2.6 kPa. The treatments did not affect the yield, but they did reduce the diameter of hazelnuts and seeds of the T50.

Key words: Basal crop coefficient, deficit irrigation, dual crop coefficient, evapotranspiration, heat ratio method.

INTRODUCCIÓN

El avellano europeo (*Corylus avellana* L.) es una especie caducifolia originaria de Mesopotamia, que produce frutos secos (aquenio) donde la semilla es de interés en la industria pastelera, chocolatera, de producción de aceites, entre otras (Ellena, 2018). Esta especie ha tenido un aumento considerable de su superficie plantada en el país, la que aumentó de 3 mil a más de 36 mil hectáreas entre 2011 y 2022 (ODEPA, 2022), de las cuales el 47% está concentrada en la Región del Maule (ODEPA, 2022).

El avellano ha sido caracterizado como sensible al estrés hídrico (Ellena, 2013; Cristofori *et al.*, 2014; Cincera *et al.*, 2019). Li *et al.* (2015) la definió como una planta isohídrica, mientras que Cristofori *et al.* (2014) menciona que la especie tiene una baja capacidad de regulación estomática. Su cultivo en secano requiere de 800 mm de precipitación distribuidas a lo largo del año (Cristofori *et al.*, 2014) y con periodos secos menores a un mes (Ellena, 2018). Por ello en condiciones como las de Chile, donde su cultivo se desarrolla en zonas de clima mediterráneo con veranos secos, contar con información para realizar un óptimo manejo del riego se vuelve relevante.

La gestión del riego requiere de una correcta estimación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c), esta es la suma de dos procesos por los cuales el agua pasa desde el suelo a la atmósfera. En superficie esto ocurre principalmente a través de evaporación (E) y en presencia de vegetación mediante la transpiración (T) del cultivo (Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2006). Existen diversas maneras de estimar ET, sin embargo, una de las más utilizadas es el enfoque FAO 56 (Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2006) quienes calculan ET_c en base a la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_o) y un coeficiente de cultivo (K_c) el cual varía entre especies y estado de desarrollo de la planta. Allen *et al.* (1998, 2006) también propusieron el enfoque de K_c dual para separar los procesos de T y E mediante un coeficiente basal de cultivo (K_{cb}), el cual se define como el cociente entre la ET_c y la ET_o , cuando la superficie del suelo se encuentra seca pero la transpiración mantiene su tasa potencial (Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2006), en cuyo caso el coeficiente de evaporación (K_e) representa el componente de evaporación en la ET_c . El enfoque dual es considerado más adecuado para la calendarización del riego en tiempo real y para riego localizado de alta frecuencia (Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2006). A su vez varios autores lo definen como más apropiado para aplicaciones de riego deficitario, secado parcial de raíces y riego por goteo (O'Connell y Goodwin 2007; Ferreira, 2012; Anderson *et al.*, 2017; Saitta *et al.*, 2020).

La determinación de K_{cb} requiere de la medición de T, lo cual ha sido realizado por diversos autores mediante sensores de flujo de savia (SFS) (Fernández *et al.*, 2008; Poblete-Echeverría *et al.*, 2012; Poblete-Echeverría y Ortega-Farias, 2013; Zhao L. y Zhao W., 2014; Zúñiga *et al.*, 2012; Rafi *et al.*, 2019; Saitta *et al.*, 2020), donde además se ha reportado con éxito el ajuste de K_{cb} en cultivos de vides y maíz (Poblete-Echeverría y Ortega-Farias, 2013, Zhao L. y Zhao W., 2014), lo cual permite una validación sitio específica de los valores de K_{cb} desarrollados por Allen *et al.* (1998, 2006) y una aplicabilidad directa hacia la programación de riegos en campo.

Uno de los métodos ampliamente utilizado como control de riego es la utilización de mediciones de potencial hídrico de tallo (Ψ_x) como indicador del estado hídrico de la planta (Blanco *et al.*, 2018; Marino *et al.*, 2018; Ahumada-Orellana *et al.*, 2019) siendo la medición a mediodía solar la que más información entrega (McCutchan y Shackel, 1992; Shackel, 2011; Beya-Marshall *et al.*, 2022). Sin embargo, las mediciones de Ψ_x varían en función de las condiciones meteorológicas, para lo cual se ha recurrido a normalizaciones en relación al déficit de presión de vapor (DPV) (McCutchan y Shackel, 1992; Fereres y Goldhamer, 2003; Shackel *et al.*, 2021, Beya-Marshall *et al.*, 2022). Shackel *et al.* (1997) propusieron que la normalización del Ψ_x en torno al DPV bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo se denomina línea base, la cual puede ser utilizada como criterio de riego (Shackel, 2007; Corell *et al.*, 2016; Shackel *et al.*, 2021; Beya-Marshall *et al.*, 2022).

La literatura acerca del avellano europeo es escasa, Allen *et al.* (1998, 2006) no definió valores de K_c y K_{cb} para la especie y solo se ha reportado el uso de K_c de 0.8 (333 plantas/ha) en plantas adultas (Ortega – Farias *et al.*, 2020) y 0.93 (833 plantas/ha) en huerto joven (Mačkić *et al.*, 2016). Respecto de trabajos realizados con SFS en la especie, se reporta el método de disipación de calor (Pasqualotto *et al.*, 2018, Pasqualotto *et al.*, 2019), no obstante, no fue realizado para ajustes de K_{cb} .

Dado el aumento en el interés en esta especie y la escasa bibliografía disponible, es necesario generar información acerca del cultivo (K_{cb} , Ψ_x , SFS, etc.) para ajustar las estimaciones de demanda hídrica de manera sitio específica y llevar un control del estado hídrico de la planta que permita optimizar los rendimientos del cultivo y el uso del agua.

OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar la demanda hídrica del avellano europeo (*Corylus avellana* (L.)) bajo condiciones no limitantes de agua y bajo riego deficitario a través del uso de sensores de flujo de savia y potencial hídrico de tallo.

Objetivos específicos

- Estimar la transpiración de *Corylus avellana* (L.) mediante el uso de sensores de flujo de savia en condiciones de campo bajo 3 niveles de riego.
- Evaluar la condición hídrica de *Corylus avellana* (L.) a través del potencial hídrico de tallo y la respuesta de la tasa transpirativa al DPV en diferentes condiciones de riego.
- Determinar valores del coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) en base a las evaluaciones de flujo de savia y compararlos con una estimación realizada en base a cobertura propuesta en FAO56.
- Medir los efectos del riego deficitario en el rendimiento y componentes de rendimiento del avellano.

MATERIALES Y MÉTODO

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo entre octubre del año 2021 y julio del año 2022, en el Fundo Vitacura, ubicado en la Comuna de Retiro sector de Villa Seca, Región del Maule (35°55'05.6"S 71°45'50.9"W, Figura 1). El clima de la región se clasifica como mediterráneo semiárido, con una temperatura promedio de 17°C y precipitaciones medias anuales de 516 mm (Poblete-Echeverría *et al.*, 2012).

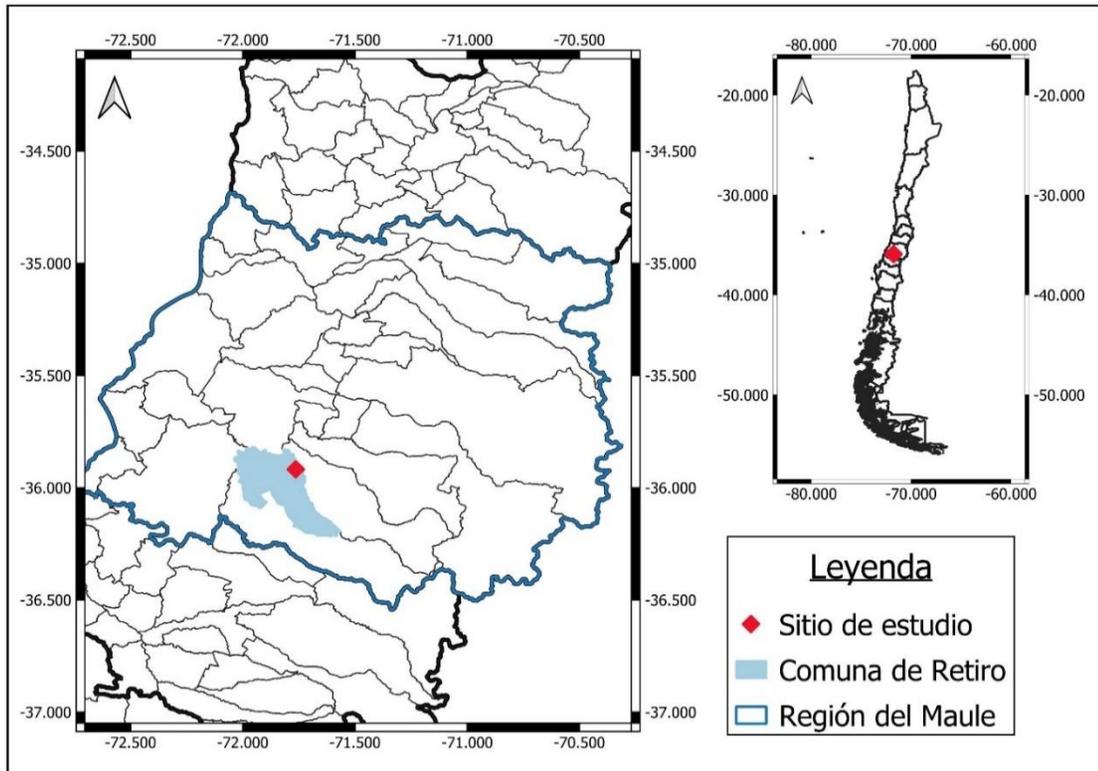


Figura 1. Ubicación sitio de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El suelo está definido como Serie Quella (Ciren, 1997), sin embargo, sobre la base de una descripción de suelo previa al establecimiento del ensayo (Anexo 1) se observó que correspondía a la Serie Campanacura (Ciren, 1997). Previo al establecimiento del huerto fueron realizadas labores de subsolado con un tractor modelo D8 (Caterpillar, Illinois, EE. UU.), realizando 1 pasada y 1 cruzada en 30°, se realizaron 4 rastros que incluyen los de incorporación de enmiendas (Capotillo (300 m³ ha⁻¹), Super Fosfato Triple (100 kg ha⁻¹), Sulfato de Potasio (300 kg ha⁻¹), Cal Agrícola (1.500 kg ha⁻¹) y Yeso Agrícola (1.000 kg ha⁻¹)), finalmente se elaboraron platabandas.

Material biológico

El estudio se llevó a cabo sobre un huerto de avellanos europeo var. “Tonda di Giffoni” como variedad principal, conducidos en “multieje”, plantados sobre platabandas en el año 2018 y con un marco de plantación rectangular de 5x4 m².

Tratamientos y diseño experimental

Se estableció un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar, siendo el factor de bloqueo profundidad de suelo, la que fue evaluada a través de calicatas en un transecto longitudinal (Figura 2). Se evaluó como parcela principal el factor disponibilidad de agua bajo tres niveles, que dadas las características del suelo fueron definidos en busca de diferencias contrastantes entre los tratamientos, además se evaluó el factor tiempo como subparcela.

Los tratamientos correspondieron al riego de huerto (T100, tratamiento control) en términos de tiempo y frecuencia con que riega regularmente el huerto (umbral de riego máximo del 30%), un 50% del riego de huerto (T50), y un 150% del riego de huerto (T150). Cada nivel contó con 3 repeticiones, la unidad experimental fue definida como 3 árboles de avellano europeo continuos sobre la hilera, siendo el árbol central la unidad de observación.

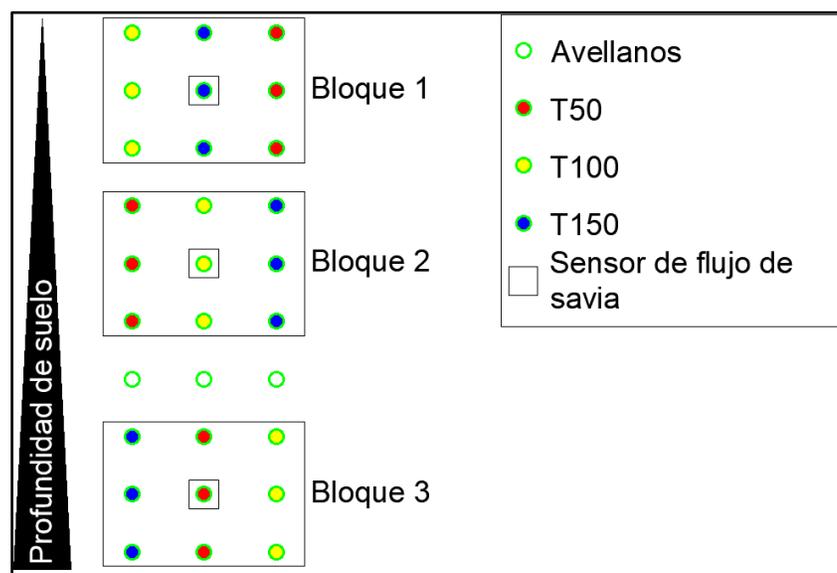


Figura 2. Diseño experimental. Fuente: elaboración propia

Se instalaron SFS SFM1 (ICT International, Australia), con agujas de 1.3 mm diámetro y 35 mm de longitud en uno de los 4 fustes (orientado al Norte) de la unidad observacional de una repetición por tratamiento (3 sensores, 1 por árbol, Figura 2), Se utilizó el kit de instalación SFM-IK1 (ICT International, Australia) con la guía de perforación de 0.5 cm entre agujeros, las agujas fueron ingresadas al tronco previamente cubiertas con grasa siliconada y el sensor

fue cubierto con papel aluminio para evitar influencias de la temperatura ambiental, radiación y daños.

Manejo del experimento

El experimento fue regado por goteo, con goteros de 2.3 L h⁻¹ a 0.5 m con una línea (“T50”), doble línea (“T100”, tratamiento control) y triple línea (“T150”), el huerto programó los riegos utilizando un K_c 0.96 ponderado por un coeficiente de cobertura (K_r) (Callejas *et al.*, 2014) de 0.65 buscando llegar a un umbral máximo de agotamiento respecto al agua aprovechable del suelo del 30%, para lo cual se consideró capacidad de campo y punto de marchitez permanente de 30.7 y 16.7 (cm³ cm⁻¹) en los primeros 30 cm y de 34.3 y 19.0 hasta los 60 cm. Se consideró que el 80% de las raíces activas se encontraba en los primeros 60 cm. En el huerto se realizaron revisiones periódicas de calicatas para corroborar la gestión del riego y se aplicó un total de 3792.6 m³ ha⁻¹ temporada⁻¹ medidos con un contador Woltman Turbo-bar (Bermad, Barcelona, España). El huerto se manejó con fertilización, poda y control de plagas y enfermedades acorde al manejo convencional de un huerto comercial.

Variables medidas

Mediciones de flujo de savia

Se midió densidad de flujo de savia (V_s (cm³ cm⁻² hr⁻¹)) cada 30 minutos mediante el método de la relación de calor (HRM) (Burgess *et al.*, 2001). Se aplicaron pulsos de calor de una duración de 2.6 segundos y se realizó una corrección por efecto de la herida de 1.7 mm. Burgess *et al.* (2001) basado en lo realizado por Marshall (1958) propuso la ecuación (Ec.) 1 para estimar la velocidad del pulso de calor (V_h (cm h⁻¹)):

$$V_h = \frac{k}{x} \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) 3600 \text{ (Ec. 1)}$$

Donde k es la difusividad térmica de la madera (cm² s⁻¹), x es la distancia entre calentador y termocupla (0.5 cm), v₁ y v₂ es el aumento en temperatura aguas abajo y aguas arriba respectivamente.

Debido a que variaciones de 1 mm en la medición del espaciamiento entre termocupla y el calentador pueden inducir errores del 20% en el cálculo de V_h (Becker, 1998), se calculó la distancia de x₂ a velocidad de flujo 0 (fin de temporada una vez caídas todas las hojas del árbol) mediante la Ec. 2 propuesta por Burgess *et al.* (2001) donde se asume que x₁ fue instalada correctamente (0.5 cm):

$$x_2 = \sqrt{4kt \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) + x_1^2} \quad (Ec. 2)$$

De esta forma V_h se calculó mediante la Ec. 3 (Burgess *et al.*, 2001):

$$V_h = \frac{4kt \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) - (x_2^2) + (x_1^2)}{2t(x_1 - x_2)} 3600 \quad (Ec. 3)$$

Posteriormente los valores de V_h fueron corregidos por el efecto de la herida propia de la instalación del sensor (V_c), utilizando la Ec. 4 propuesta por Burgess *et al.* (2001):

$$V_c = bV_h + cV_h^2 + dV_h^3 \quad (Ec. 4)$$

Los valores de b, c y d son coeficientes calculados mediante modelos de diferencias finitas que varían según el tamaño de la herida, tamaño de las agujas y espaciamiento entre ellas (Burgess *et al.*, 2001) (Anexo 2). Finalmente, la densidad de flujo de savia (V_s , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$) fue calculada en base a la ecuación propuesta por Marshall (1958) que fue modificada por Barret *et al.* (1995) (Ec.5):

$$V_s = \frac{V_c \rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} \quad (Ec. 5)$$

Donde ρ_b es la densidad de la madera (peso seco (kg) volumen en fresco $^{-1}(\text{m}^3)$), c_w y c_s son el calor específico de la madera ($1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a 20°C (Lide, 1992)) y savia respectivamente, para la cual se utiliza el valor correspondiente al agua ($4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a 20°C (Lide, 1992)); m_c es el contenido de agua de la albura (kg kg^{-1}) y ρ_s es la densidad del agua (1000 kg m^{-3}).

Transpiración mediante sensores de flujo de savia

Para el cálculo de transpiración mediante SFS (T_{sap} (mm día^{-1})) se calculó en primera instancia el flujo volumétrico de savia Q (L h^{-1}) según lo realizado por Poblete-Echeverría *et al.* (2012) basado en Hatton *et al.* (1990):

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n A_i V_{s_i}}{1000} \quad (Ec. 6)$$

Donde A_i es el área de albura conductora (cm^2), i es el termistor correspondiente a una profundidad definida (cm) utilizada para el cálculo de área conductora. Posteriormente se calculó T_{sap} (mm día^{-1}) mediante la Ec. 7:

$$T_{\text{sap}} = \frac{t \sum_{j=1}^n Q_j}{D_e D_s f_h} \quad (Ec. 7)$$

Donde t es en intervalo de tiempo entre mediciones, j es el número de medición en el día, D_e y D_s son las distancias entre y sobre hilera de la plantación respectivamente y f_h es la fracción de suelo humedecido dentro del marco de plantación, la cual se calculó utilizando el ancho del camellón ($[\text{ancho camellón} * D_s] / [D_e * D_s]$)

Estimación del área de albura conductora, densidad de la madera fresca y contenido de agua en la albura

El área de albura conductora fue estimada mediante la relación alométrica entre diámetro de tronco y el área de albura (Anexo 3). Se realizaron pruebas de tinción pasiva con colorante alimenticio para determinar el área de xilema activo, estas arrojaron una fracción ínfima de xilema no conductor, por lo cual se tomaron muestras de 8 ramas de diferente diámetro de tronco de árboles contiguos al ensayo, se extrajo la corteza y se pusieron en agua destilada durante 48 h. Una vez hidratados se calculó el área de xilema conductor en base a el radio promedio de albura (se descontó el duramen) y el volumen en fresco (VF) de cada muestra. Luego fueron pesadas (MF), y posteriormente se llevaron a estufa (4 días a 75°C) para medir su masa seca (MS). Calculando así densidad de madera (MS/VF) y contenido de agua en la albura ($(MF - MS) / MS$)

Variables ambientales y evapotranspiración de referencia

Se midió radiación neta (R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)), temperatura del aire (T° ($^\circ\text{C}$)) y velocidad del viento (u_2 (m s^{-1})) a 2 m de altura y humedad relativa (HR (%)) cada 15 min mediante una estación climática (modelo Vantage Pro, Davis, Estados Unidos, California) ubicada fuera del huerto al interior del sitio de estudio. En función de esto se estimó ET_o (mm día^{-1}) con la ecuación FAO Penman Monteith (Ec. 8) sobre un cultivo de referencia con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 (Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2006):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T^\circ + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde G es el flujo de calor al suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) el cual se consideró 0, asumiendo que la absorción de calor durante el día y la liberación de este durante la noche es equivalente, e_s presión de vapor de saturación (kPa), e_a presión actual de vapor (kPa), Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($4098 * e_s / (T^\circ + 237.3)^2$ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)) y γ constante psicométrica ($0.0000636 * T^\circ + 0.064586$ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)).

Determinación del coeficiente basal de cultivo

Se estimó el valor de coeficiente basal de media temporada en base a la fracción de cobertura y cobertura efectiva ($K_{cb fc}$) mediante la ecuación propuesta por Allen *et al.* (1998, 2006):

$$K_{cb fc} = K_{c min} + (K_{cb full} - K_{c min}) \left(\min \left(1; 2f_c; (f_{c eff})^{\frac{1}{1+h}} \right) \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde $K_{c \min}$ corresponde al valor mínimo de K_c para suelo desnudo (0.15 – 0.20), $K_{cb \text{ full}}$ corresponde al valor de K_{cb} a mediados de temporada con el máximo tamaño y altura de la planta, f_c es la fracción observada de cobertura de suelo cubierta por la copa de un árbol, asumiendo que la planta se mira desde arriba, $f_{c \text{ eff}}$ es la fracción de cobertura efectiva y h es la altura promedio de las plantas durante media temporada.

El valor de $K_{cb \text{ full}}$ fue estimado en función de la Ec. 13 propuesta por Allen *et al.* (1998, 2006):

$$K_{cb \text{ full}} = K_{cb,h} + (0.004(u_2 - 2) - 0.004 (HR_{\min} - 45)) \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde $K_{cb,h}$ corresponde a vegetación con cobertura completa (IAF>3), en condiciones sub-húmedas y vientos suaves para cultivos de $h \leq 2$ m, sin embargo, se utilizó 1.2 debido a que el avellano europeo supera los 2 m de altura.

Además, se estimó K_{cb} en base a las mediciones de T_{sap} (mm día⁻¹) y ET_o (mm día⁻¹) mediante la Ec. 14:

$$K_{cb_sap} = \frac{T_{\text{sap}}}{ET_o} \quad (\text{Ec. 14})$$

Medición de f_c y $f_{c \text{ eff}}$

Se midió f_c y $f_{c \text{ eff}}$ calculando el área de copa y sombra proyectada, respectivamente, mediante mediciones del diámetro de copa y sombra a medio día solar a lo largo y ancho del camellón con una cinta métrica.

Condición hídrica del cultivo

Se evaluó la condición hídrica del cultivo a través de mediciones del potencial hídrico de tallo (Ψ_x) a mediodía solar, con una cámara de presión Pump – Up (PMS Instruments, Oregon, USA) sobre hojas sanas, totalmente expandidas del tercio medio del árbol. Entre 1 y 2 h antes de la medición, las hojas fueron envueltas en bolsas de aluminio herméticas para suprimir el flujo transpirativo, permitiendo así el equilibrio entre el potencial de la hoja y el del xilema. Las mediciones se realizaron al menos cada 15 días en cada repetición (2 hojas por árbol). Se asumió que la planta estaba en buena condición hídrica cuando los valores de Ψ_x fueron mayores a -0.7 MPa (Ortega-Farías *et al.*, 2020).

Relación potencial hídrico xilemático DPV y línea base

Se relacionaron las mediciones de Ψ_x realizadas a lo largo de la temporada y DPV medido con la estación climática del huerto. La regresión $\Psi_x \text{ vs DPV}$ consideró todas las mediciones efectuadas, la línea base por su parte consideró mediciones realizadas como máximo 1 día después del riego en los tratamientos T100 y T150, dado que se observó una respuesta inmediata en las V_s los días de riego (Figura 7), además se descartaron los puntos situados bajo la regresión $\Psi_x \text{ DPV}$.

Rendimiento y componentes del rendimiento

Se cosecharon todas las avellanas de la planta central de cada unidad experimental, se midió masa seca de avellanas, se tomó una submuestra representativa de 100 avellanas por cada árbol cosechado (900 avellanas en total), con ello se obtuvo diámetro de avellanas y semillas, número de avellanas por árbol, % de avellanas sin semillas y relación masa cáscara/masa semillas.

Caracterización de propiedades físicas de suelo

Se tomaron 3 muestras de suelo por horizonte en cilindros y disturbadas para realizar mediciones de propiedades físicas del suelo. Se determinó densidad aparente mediante el método del cilindro, densidad real mediante el método del picnómetro, clase textural mediante hidrómetro de Bouyoucos, capacidad de campo y punto de marchitez permanente mediante ollas de presión a 33 y 1500 kPa respectivamente, siguiendo la metodología detallada en Sandoval *et al.* (2012) (Anexo 1).

Caracterización de la distribución de los bulbos de mojamiento

A mediados de temporada se realizaron calicatas en las unidades observacionales de una hilera del ensayo (una calicata por tratamiento), de manera transversal a la orientación de la hilera de plantación. Se tomaron mediciones de contenido volumétrico de agua mediante un medidor de contenido de agua de suelo (modelo TDR 150, Spectrum Technologies, EE UU, Illinois) utilizando una grilla de 10 x 10 cm², posteriormente los datos fueron analizados mediante el software SigmaPlot v14.0 (Anexo 4).

Análisis estadístico

Las variables rendimiento y componentes de rendimiento fueron analizadas mediante ANDEVA de 2 vías. El Ψ_x fue analizado mediante el modelo de parcelas divididas en bloques completos al azar, considerando disponibilidad de agua como parcela principal, el factor tiempo como subparcela y como factor de bloqueo profundidad de suelo. Los análisis fueron realizados considerando un nivel de significancia de 0.05 y análisis post hoc LSD-Fisher.

El Ψ_x fue relacionado al déficit de presión de vapor a través de regresiones lineales, V_s fue relacionado al DPV mediante un modelo logístico ($y = a/(1+e^{(-c*x-b)})$), ambos ajustados mediante el método de mínimos cuadrados. Se evaluó el ajuste de las curvas mediante el coeficiente de determinación (R^2 , solo en las regresiones lineales), error estándar residual (RSE), error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Los coeficientes de cultivos y densidades de flujo de savia fueron comparados de manera descriptiva.

El manejo de datos se realizó con Rstudio con la librería de 'tidyverse' los análisis estadísticos fueron realizados con el software InfoStat v. 2020e (DiRienzo *et al.*, 2020).

RESULTADOS

Datos meteorológicos

La temporada 2021/2022 acumuló 86.6 mm de precipitaciones y 903 mm de ET_o entre los meses de septiembre y abril, se obtuvo una ET_o media de 4.25 mm, 6.85 mm de máxima y 0.7 mm de mínima. La temperatura media fue de 16.78 °C, se alcanzó una máxima de 36.32 °C y 1.37 °C de mínima, la humedad relativa por su parte tuvo una media de 53.31%, 91.7% de máxima y 1.03% de mínima (Figura 3).

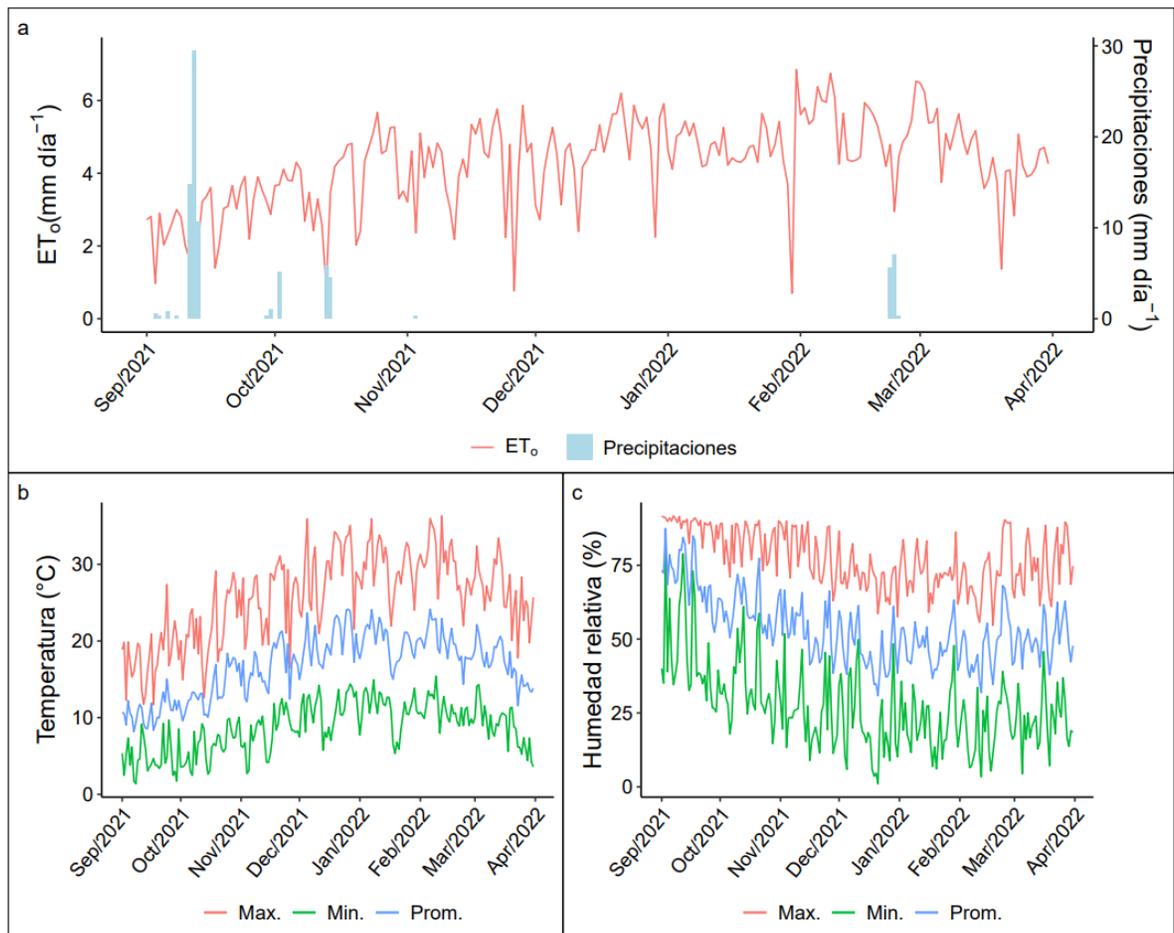


Figura 3. (a) Evapotranspiración de referencia (— , mm día^{-1}) y precipitaciones (■ , mm día^{-1}). (b y c) Temperatura y humedad relativa máxima (—), mínima (—) y promedio (—) medidas entre septiembre del 2021 y abril del 2022.

Transpiración en base a sensores de flujo de savia

La Figura 4 muestra los resultados del cálculo de T_{sap} y su comportamiento con la ET_o , donde es posible observar que las curvas muestran respuesta a las variaciones diarias de la ET_o , particularmente en los días que esta última disminuye. En términos de magnitudes el T50 presentó valores de T_{sap} más bajos, especialmente en los días previos al riego cuando la planta se encontraba en las condiciones más estresantes. El T150 por su parte fue el que presentó los valores de T_{sap} más altos, seguido por el T100, lo cual era esperable debido a que la unidad observacional con sensor de flujo de savia del T150 presentaba la mayor área de albura (36.67 cm^2), seguido por el T50 (30.32 cm^2) y el T100 (29.33 cm^2) (Anexo 3).

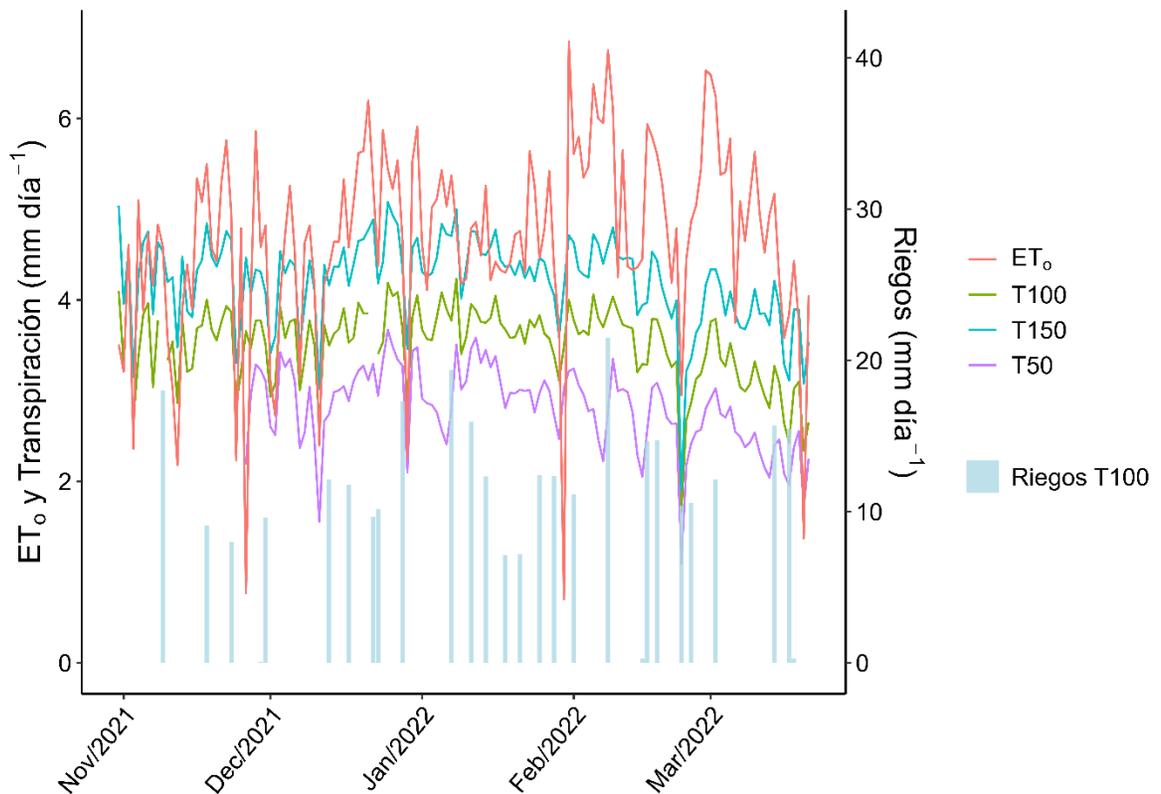


Figura 4. Transpiración calculada en base sensores de flujo de savia ($n = 3$, mm día^{-1}) para los tratamientos T100(—), T150(—) y T50(—), ET_o (—, mm día^{-1}) y riegos aplicados al T100 (■, mm día^{-1}).

Mediciones de potencial hídrico xilemático

En la Figura 5 se presenta el efecto de los tratamientos sobre el potencial xilemático a mediodía solar. Los resultados indican diferencias significativas entre los tres tratamientos (p -valor tratamiento < 0.0001 y bloque 0.0008) siendo el T150 el que presentó la media más

alta (-0.7 MPa, Figura 5b), seguido por el T100 (-0.77 MPa, Figura 5b) y finalmente el T50 (-0.89 MPa, Figura 5b). Durante las últimas semanas de diciembre y primeras de enero, el campo sufrió una ruptura de la matriz que alimentaba el sector de riego en que estaba ubicado el ensayo lo cual no permitió respetar el UR del 30% que se había establecido. El día previo a la reposición del riego en el sector se obtuvieron los valores de Ψ_x más bajos en la temporada para el T100 y el T50 (6/1/2022, Figura 5a), siendo la única fecha en que hubo diferencias significativas entre los 3 tratamientos. En esa fecha el T150 obtuvo una media de -0.79 MPa en contraste a las medias del T100 (-0.97 MPa) y el T50 (-1.18 MPa) mostrando que las plantas del T100 y T50 sufrieron estrés durante la temporada y explica las diferencias significativas presentadas en la Figura 5b.

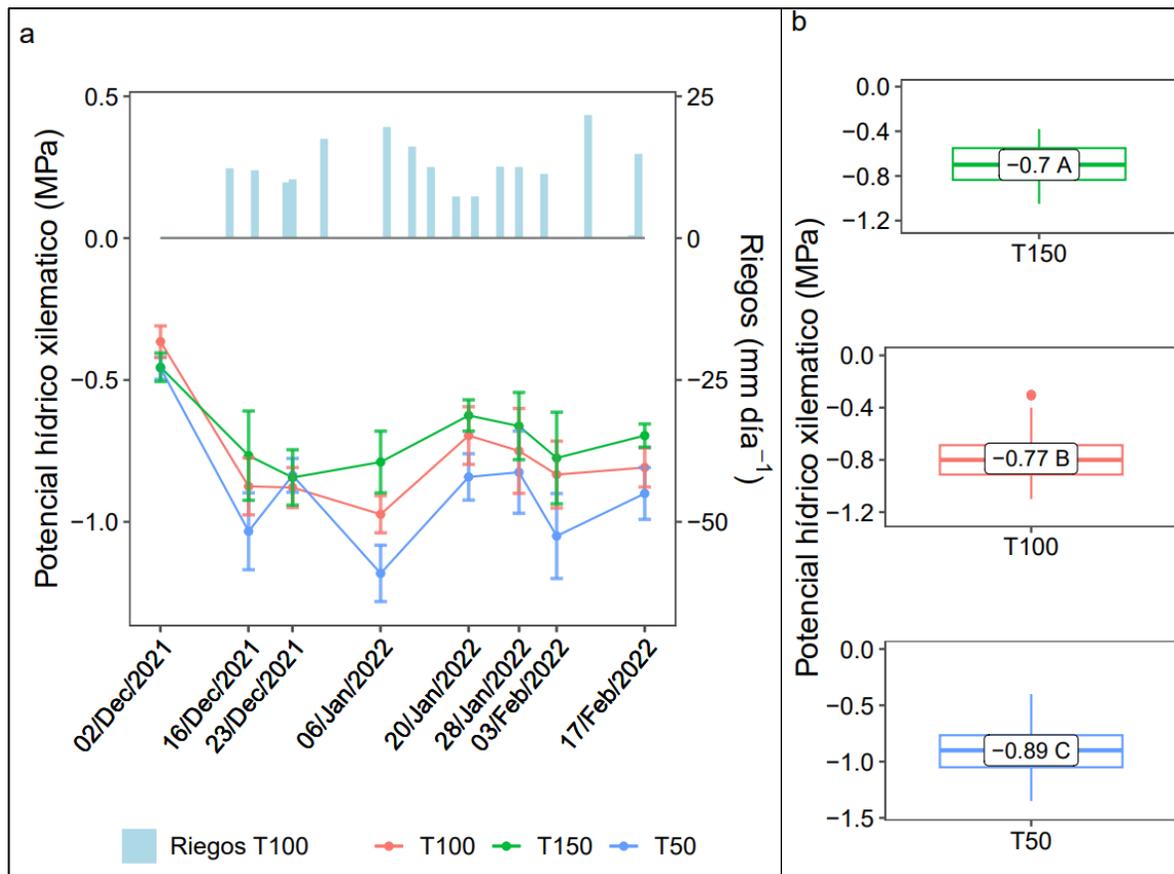


Figura 5. (a) Evaluaciones de potencial hídrico xilemático a medio día solar por fecha para los T100(—●—), T150(—●—) y T50(—●—) y riegos aplicados al T100 (■, mm día⁻¹), barras verticales representan intervalos de confianza al 95%. (b) Efecto de los distintos tratamientos de riego sobre el potencial hídrico xilemático de tallo a mediodía solar durante la temporada. Los valores indican las medias para cada tratamiento (n = 24), letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas acorde a la prueba LSD Fisher (p – valor < 0.05).

Relación entre el potencial hídrico xilemático y DPV

La Figura 6 muestra la relación entre el Ψ_x y el DPV. Las regresiones lineales que consideraron todas las mediciones y la línea base fueron de pendiente negativa y resultaron significativas (p -valor < 0.0001). La línea base tuvo un pendiente de $-0.17 \text{ MPa kPa}^{-1}$, menor a los $-0.2 \text{ MPa kPa}^{-1}$ obtenida en la regresión Ψ_x DPV. Además, la línea base presentó un R^2 de 0.81, mejor que el 0.47 obtenido considerando todos los puntos.

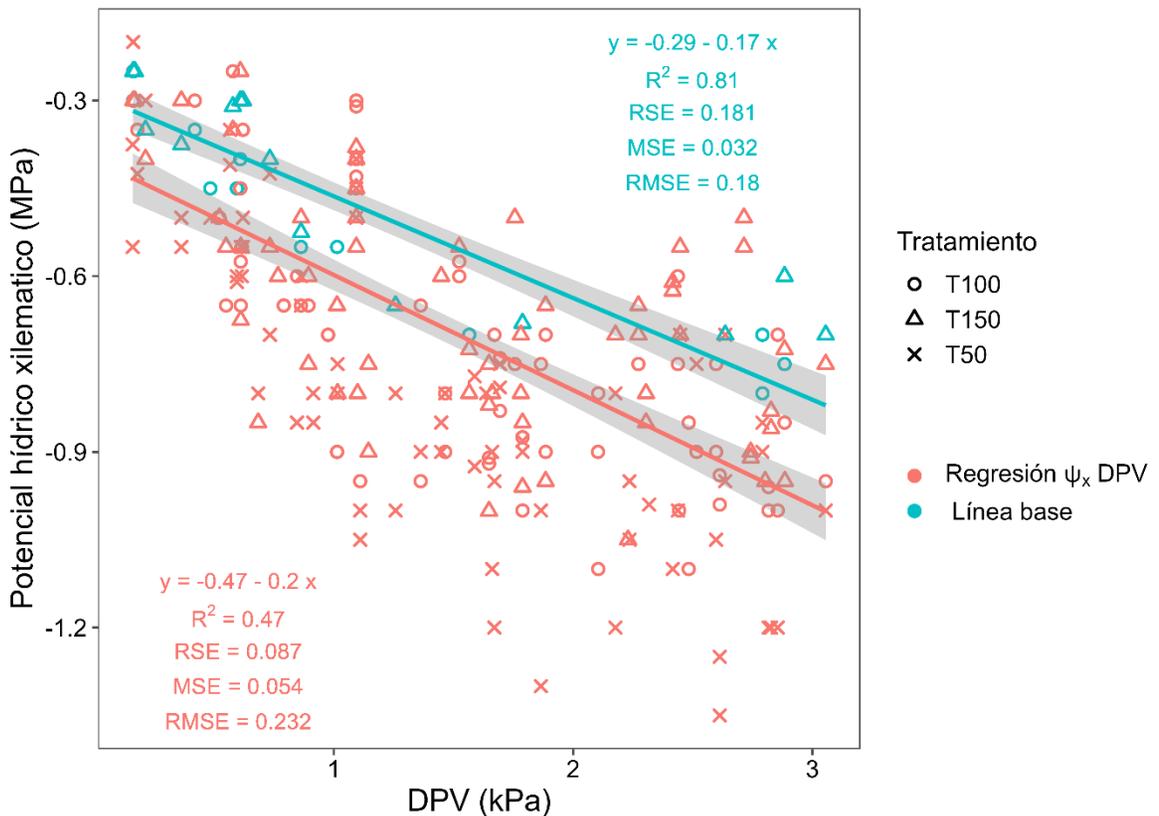


Figura 6. Relación entre potencial hídrico xilemático y DPV. La recta — (n = 238) representa la regresión considerando todos los puntos, la recta — (n = 50) representa la línea base considerando las mediciones superiores a la recta — del T100 y T150 efectuadas máximo 1 día después del riego, el área sombreada representa los intervalos de confianza al 95%.

Densidad de flujo de savia

Las mediciones de V_s registraron las medias más altas en el T100 y el T150 con 23.46 y $20.71 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2}$ (Cuadro 1) mientras que el T50 mostró la media más baja durante la temporada ($18.16 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2}$), a su vez los valores máximos alcanzados muestran magnitudes menores

para el T50 ($61.09 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2}$) en comparación con el T150 y T100 (81.95 y $72.66 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2}$, respectivamente), siendo este último el que alcanzó el valor más alto (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de distintos tratamientos de riego sobre la densidad de flujo de savia ($\text{cm}^3\text{cm}^{-2}$) durante la temporada.

Tratamiento	n	Media	Mediana	D.E.	CV	Mín	Máx
T100	4521	23.46	18.61	18.3	78.1	-5.32	81.95
T150	4522	22.71	16.86	18.1	79.8	-0.33	72.66
T50	4522	18.16	10.71	16.5	90.7	-1.38	61.09

La Figura 7 muestra la dinámica diaria de las mediciones de V_s el día antes, durante y después del riego en una fecha de cada mes de medición. Para el día antes del riego del mes de diciembre (Figura 7a), las curvas de los tratamientos no se separan de manera notoria. En los meses de enero y febrero (Figuras 7b y 7c), el día antes del riego existe una disminución de la V_s del T50, la que aumenta sustantivamente luego del riego equiparándose con el T100 y el T150. Esto es un indicio de la capacidad de recuperación que presentaría el avellano europeo a condiciones de estrés hídrico ligero a moderado. Durante el mes de marzo (Figura 7d) el T50 repite el patrón de menor flujo durante el día antes del riego, sin embargo, una vez regado el cultivo el tratamiento más restrictivo, la V_s no se iguala a los tratamientos T100 y T150, probablemente debido a la restricción hídrica acumulada en la temporada.

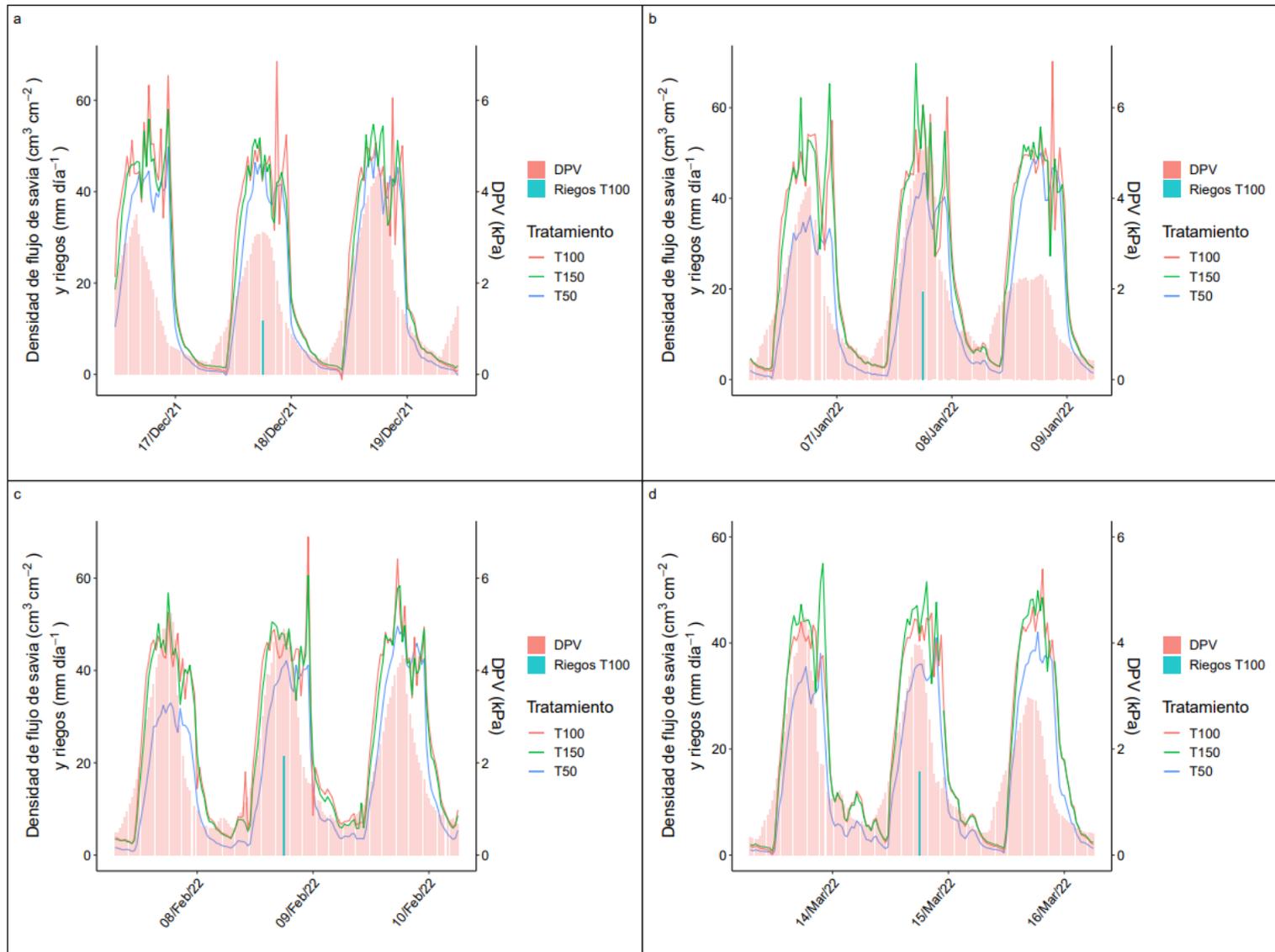


Figura 7. Densidad de flujo de savia (cm³cm⁻²) un día antes, durante y un día después del riego durante los meses de diciembre (a), enero (b), febrero (c) y marzo (d) para los tratamientos T100(—), T150 (—) y T50 (—), DPV (■, kPa) y riegos aplicados al T100 (■, mm día⁻¹).

La Figura 8 muestra la sensibilidad del flujo de savia al DPV. La curva corresponde a un modelo logístico el cual alcanza su asíntota a una densidad de flujo de savia de $44.02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$. El punto de inflexión de la curva ocurre a los 1.46 kPa, lo cual indica que a DPV mayores a este, el avellano vería afectada su tasa transpirativa debido a la alta demanda atmosférica. Otros valores umbrales corresponden al intervalo entre 2.2 y 2.6 kPa (sección gris de la Figura 8), donde la densidad de flujo de savia (símil a la tasa de transpiración) sigue aumentando en función del DPV pero de manera desacelerada producto del control estomático.

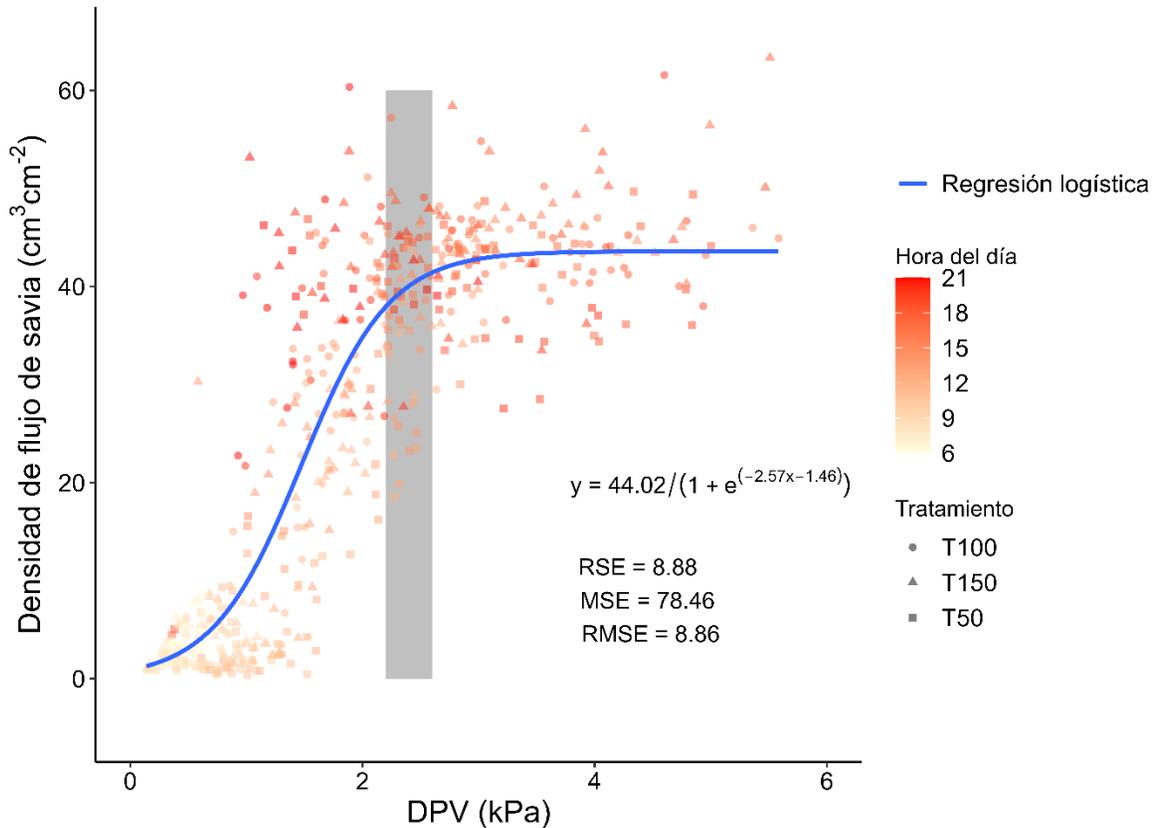


Figura 8. Relación entre densidad de flujo de savia ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2}$) y DPV (kPa) entre las 6:00 h y 21:00 h, sección gris (■) representa el rango de entre 2.2 y 2.6 kPa, — representa la regresión logística considerando 3 tratamientos, ●, ▲ y ■ representa al T100, T150 y T50 respectivamente.

Coefficientes basales de cultivo

La Figura 9 muestra los valores de $K_{cb \text{ fc}}$ (FAO) y $K_{cb \text{ sap}}$ (sap), donde las medias de $K_{cb \text{ fc}}$ tendieron a ser similares al $T100_{\text{sap}}$ (0.74), con valores que fluctuaron entre 0.69 ($T50_{\text{FAO}}$) y 0.73 ($T150_{\text{FAO}}$). El K_{cb} medido a través de flujo de savia en el T50 tendió a ser menor al del resto de los tratamientos, con una media de 0.59, por otra parte el $T150_{\text{sap}}$ presentó el mayor K_{cb} (0.89).

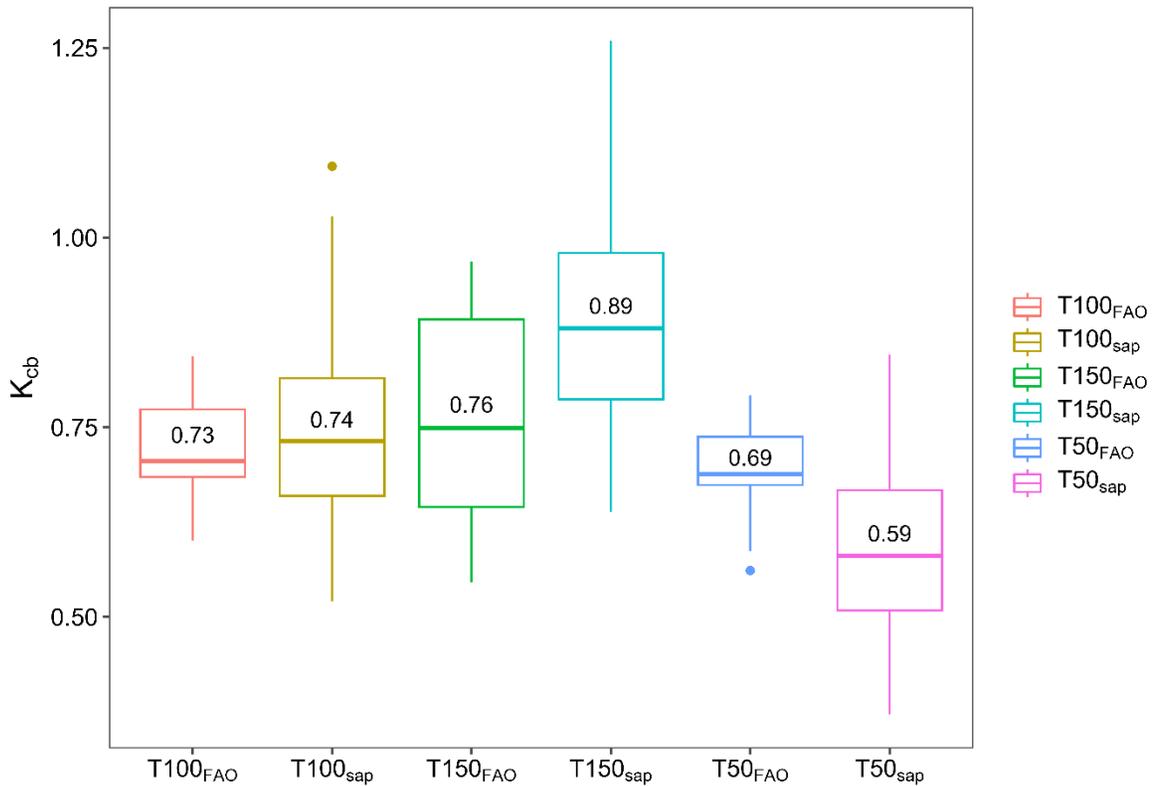


Figura 9. Coeficientes basales de cultivo en base a flujo de savia (sap, n (T100 y T150) = 132, n (T50) = 111) y f_c y $f_{c\text{ eff}}$ (FAO) por tratamiento (n = 9), los valores indican las medias obtenidas.

Rendimiento y componentes de rendimiento

Los resultados de rendimiento (Masa seca total, Cuadro 2) no arrojaron diferencias significativas entre los tratamientos (p-valor = 0.6194), con una media general de 3.18 kg árbol⁻¹ (1591.67 kg ha⁻¹ de masa seca).

Se observaron diferencias significativas en la masa de avellanas que al día de la cosecha se había desprendido del árbol (p-valor = 0.0144), donde el T150 tuvo una masa seca en el suelo (2.93 kg árbol⁻¹) mayor a la medida en el T50 (1.36 kg árbol⁻¹). El T100 por su parte tuvo un valor intermedio, sin diferencias significativas.

No se encontraron diferencias significativas en la masa de la cascara, la masa de semilla y el rendimiento al descascarado (p-valor = 0.5862, 0.6605 y 0.6822 respectivamente), sin embargo hubo diferencias significativas en el diámetro de avellanas y de semillas (p-valor = 0.0058 y 0.0427 respectivamente) donde el T50 redujo el diámetro de la avellana en 0.61 mm respecto al T100 y 0.82 mm con el T150, por otro lado hubo diferencias significativas entre

el T150 y el T50 en el diámetro de semilla, donde este último redujo en 0.75 mm el diámetro en comparación con el T150. Finalmente, no se encontraron diferencias significativas en la altura de la avellana y semilla (p-valor = 0.8710 y 0.5975 respectivamente), número de avellanas por árbol y porcentaje de avellanas sin semillas (p-valor = 0.7775 y 0.8255 respectivamente).

Cuadro 2. Efecto de distintos tratamientos de riego sobre el rendimiento, fruta caída al momento de la cosecha, masa de cascara y semilla, diámetro de avellana y semilla, altura de avellana y semilla, número de avellanas por árbol y el % de avellanas sin semillas. Medias con letras distintas dentro de la misma fila representa diferencias estadísticamente significativas acorde a la prueba LSD Fisher (p – valor < 0.05).

	n	E.E.	Medias			p-valor Tratamiento
			T150	T100	T50	
Masa seca total (kg árbol ⁻¹)	3	0.59	3.69 A	2.92 A	2.94 A	0.6194
Masa seca en la copa (kg árbol ⁻¹)	3	0.50	0.75 A	0.79 A	1.58 A	0.4843
Masa seca en el suelo (kg árbol ⁻¹)	3	0.21	2.93 A	2.13 AB	1.36 B	0.0144*
Masa cascara (kg árbol ⁻¹)	3	0.31	1.97 A	1.55 A	1.55 A	0.5862
Masa semilla (kg árbol ⁻¹)	3	0.28	1.72 A	1.37 A	1.39 A	0.6605
Masa semilla/avellana	3	1%	47% A	47% A	48% A	0.6822
Diámetro avellana (mm)	3	0.09	18.16 A	17.95 A	17.34 B	0.0058*
Diámetro semilla (mm)	3	0.14	14.45 A	14.11 AB	13.70 B	0.0427*
Altura avellana (mm)	3	0.41	19.45 A	19.71 A	19.43 A	0.871
Altura semilla (mm)	3	0.16	14.96 A	15.01 A	14.78 A	0.5975
Nº de avellanas árbol ⁻¹	3	251.84	1361.88 A	1101.56 A	1217.89 A	0.7775
% de avellanas sin semillas	3	2%	9% A	9% A	7% A	0.8255

DISCUSIÓN

Transpiración en base a sensores de flujo de savia

Los resultados de T_{sap} mostraron concordancia con las variaciones diarias de ET_o (Figura 4), observándose consistentemente una magnitud mayor del T150 respecto al T100 principalmente debido a que el T150 presentaba una mayor área de albura (Anexo 3). Si se desea escalar la medición de T_{sap} desde una planta individual a nivel de huerto se requiere de plantas representativas en términos de diámetro de tallo (Zhao L. y Zhao W., 2014). Teniendo esto en cuenta, los SFS podrían ser una herramienta para el ajuste de K_{cb} bajo condiciones de campo (Poblete y Ortega, 2013) apoyando así la gestión del riego de un huerto. Por otra parte, generar umbrales de riego a partir de las magnitudes de la medición podría no ser representativo del estado hídrico de la planta dado que los datos mostraron no estar exentos de la variabilidad ambiental, prueba de esto son las disminuciones T_{sap} los días de baja ET_o (Figura 4) donde la menor T_{sap} se debe a la menor demanda atmosférica y no necesariamente a una deficiencia hídrica.

Potencial hídrico xilemático como indicador del nivel de estrés

Ortega-Farias *et al.* (2020) sugirieron que avellanos bien regados tendrían Ψ_x de -0.7 MPa o mayores, mientras que Grau y Sandoval (2009) sugirieron -0.85 MPa como el valor más bajo alcanzado por avellanos bien regados. Para el caso de la vid se ha reportado valores umbrales de Ψ_x de -0.7 MPa (Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005; Williams y Baeza, 2007; Galves *et al.*, 2014) e incluso de -1 Mpa para plantas en buena condición hídrica (Sellés *et al.*, 2002; Deloire *et al.*, 2004). En nuestro experimento, el T150 tuvo valores de -0.7 MPa y el T100 de -0.77 MPa, encontrándose en un rango de potenciales que no se traducirían en estrés hídrico. Por otro lado, T50 tuvo una media de -0.89 MPa (Figura 5b), situándose en una condición de estrés leve a moderado.

El T50 para el 06/01/2022 obtuvo el Ψ_x más bajo registrado en la temporada (-1.18 MPa, Figura 5a). Para esta misma fecha el T100 habría sufrido un estrés moderado siendo la única ocasión en que se observaron diferencias significativas entre en T100 y el T150. La restricción hídrica habría tenido un efecto menor en este último debido a que la disposición de las líneas de goteros (triple línea) mejoraron la distribución del bulbo de mojamiento respecto a los otros tratamientos (Anexo 4) lo cual implicó una mayor zona humedecida explorable para las raíces y por ende un mayor contenido de agua disponible que permitió tolerar de mejor manera la falta de riego.

Relación entre el potencial hídrico xilemático y DPV

El desarrollo de líneas base en diferentes frutales ha sido realizado considerando condiciones no limitantes de agua (Shackel *et al.*, 2021). Valores de Ψ_x sobre la recta indica plantas sin estrés, en caso contrario, cuando los valores de Ψ_x son inferiores a la línea base el riego sería deficitario (Galvez *et al.*, 2014). Dado que se ha reportado la sensibilidad del avellano al DPV (Cincera *et al.*, 2019, Pasqualotto *et al.*, 2018) establecer líneas base para la especie sería una buena estrategia de control de riego.

La línea base desarrollada obtuvo un R^2 de 0.81, al igual que las líneas base propuestas por McCutchan y Shackel (1992) para árboles del género *Prunus* y Beya-Marshall *et al.* (2021) para paltos, además los RMSE obtenidos (0.23 y 0.18, Figura 6) muestran un buen desempeño de las rectas.

En la literatura no existen líneas base desarrolladas para avellano europeo, por lo cual la recta presentada en este trabajo permite una mejor evaluación de la condición hídrica de la especie en base a mediciones de Ψ_x a medio día solar que los valores de no estrés reportados por Ortega-Farias *et al.* (2020) y Grau y Sandoval (2009) ya que estos no consideran el efecto del clima sobre la medición. Es importante continuar con el estudio de estos parámetros en avellano europeo, situando ensayos en huertos adultos y considerando el estado fenológico al momento de la medición dado que se ha reportado en otras especies que la relación entre Ψ_x y DPV puede variar según el estado fenológico (McCutchan y Shackel, 1992; Marsal *et al.*, 2002; Olivo *et al.*, 2009)

Densidad de flujo de savia

Las mediciones de V_s mostraron respuesta a las condiciones meteorológicas particularmente a los aumentos en el DPV (Figura 7). La respuesta de la V_s al contenido de agua en el suelo fue notoria solo en el T50 especialmente los días previos al riego (Figura 7), por otro lado, cuando el contenido de agua fue mínimo en los tratamientos producto de la ruptura de la matriz (06/01/2022) las V_s de los tratamientos T100 y T150 fueron similares, aun cuando fue la única fecha en que hubo diferencias significativas en los Ψ_x del T100 (-0.97 MPa) y el T150 (-0.79 MPa). De esto se podría concluir que los umbrales de potencial hídrico xilemático propuestos por Ortega-Farias *et al.* (2020) y Grau y Sandoval (2009) podrían estar sobreestimando el nivel de estrés. No obstante, los -1.18 MPa del tratamiento T50 causó una disminución sustantiva de V_s .

Se observó una alta sensibilidad de V_s al DPV (Figura 8). Pasqualotto *et al.* (2018) midieron la transpiración por unidad área de hoja calculada en base a SFS en un rango amplio de DPV, estableciendo una estabilización de la tasa de transpiración entre 1 y 1.5 kPa. Por otro lado, Cincera *et al.* (2019) describió que la transpiración a nivel de hoja en avellano europeo var. “Tonda di Giffoni” respondía lineal y positivamente a los aumentos en DPV hasta los 4.33 kPa, luego de esto se estabilizaba. Estos resultados no se condicen con lo obtenido en la relación V_s DPV (Figura 8) donde a los 1.46 kPa el aumento de V_s respecto al DPV comienza

a verse desacelerado siendo más pronunciado entre los 2.2 y 2.6 kPa (sección gris, Figura 8), dadas estas diferencias es importante continuar con el estudio del comportamiento de la transpiración respecto al DPV en avellanos.

Coefficientes basales de cultivo

Los resultados de las mediciones de $K_{cb\ fc}$ (Figura 9) arrojaron valores similares para los 3 tratamientos, siendo el T150 el que alcanzo la media más alta, seguido por el T100 y finalmente el T50 (0.76, 0.73, 0.69 respectivamente, Figura 9), esto se condice además con los resultados de T_{sap} que mostraron una mayor transpiración de manera consistente para el T150. Debido a que el cálculo de $K_{cb\ fc}$ fue realizado en base a mediciones de cobertura la disminución en la media del T50 respecto a los otros tratamientos podría deberse a una reducción en la tasa de crecimiento del tratamiento debido al estrés hídrico inducido, a su vez el T150 podría haber tenido una mayor elongación de brotes a causa de haber recibido un 50% más en la fertilización de la temporada (triple línea de goteros). Sin embargo, dada las características del suelo y las enmiendas aplicadas al momento de la plantación este efecto debiera haber sido de menor importancia que la restricción hídrica, tal como lo refleja la baja diferencia entre los K_{cb} estimados entre el T100 y el T150.

Los resultados de $K_{cb\ sap}$ del T100 se condicen con los estimados en base a cobertura, sin embargo, el T50 mostró una media menor que la del $K_{cb\ fc}$ (Figura 9), esto debido a que las mediciones de T_{sap} , detectan los efectos del déficit de riego (Saitta *et al.*, 2020).

La estimación $K_{cb\ fc}$ fue realizada mediante el uso de una cinta métrica, dado que el avellano deja pasar poca o ninguna luz a través de sus copas, en caso contrario sería necesario la utilización de un ceptómetro lineal. El método utilizado para la estimación de $K_{cb\ fc}$ es una opción simple y de bajo costo para la estimación de K_{cb} bajo condiciones no limitantes de agua, tal como lo mostraron las diferencias con $K_{cb\ sap}$, y podría ser utilizada cuando no existe información de la especie. La integración de las reducciones transpirativas en el $K_{cb\ sap}$ facilitaría la realización de balances hídricos lo cual es una aplicabilidad directa hacia la estimación de demanda hídrica y por ende a las programaciones de riego. El manejo de datos provenientes de SFS requiere de personal capacitado dado el tamaño de las bases de datos y el número de correcciones a realizar, esto podría ser una limitante para el uso directo por el agricultor, la utilización y desarrollo de modelos que integren esta tecnología podrían facilitar la interpretación de los resultados.

Rendimiento y componentes de rendimiento

No se hallaron diferencias significativas en el rendimiento entre los tratamientos, lo cual no se condice con la definición de especie sensible al estrés hídrico dada por diversos autores (Ellena, 2013; Cristofori *et al.*, 2014; Cincera *et al.*, 2019), por otro lado, el ensayo fue establecido sobre un suelo FA en superficie a A en profundidad, esto habría permitido,

particularmente al T50, contar con una mayor cantidad de agua disponible y enfrentar de mejor manera el estrés inducido.

Ortega – Farias *et al.* (2020) detuvieron el riego en avellanos plantados en la Región del Maule a partir de la etapa III de la curva de desarrollo del fruto (primeras semanas de enero), y repusieron el riego una vez alcanzados umbrales de Ψ_x de -1MPa (T2), -1.3MPa (T3) y -1.6MPa (T4); al evaluar rendimiento solo encontraron diferencias significativas entre el tratamiento control (T1 con reposición del 100% de ET_c) y T4, si bien el estrés inducido por Ortega-Farias *et al.* (2020) fue distinto al realizado para el desarrollo de esta tesis, la media de Ψ_x más baja registrada para el T50, en aproximadamente la misma fecha que los cortes de riego realizados por Ortega – Farias *et al.* (2020), fue de -1.18 MPa (06/01/2022, Figura 5a), lo cual se sitúa sobre el rango del T3 y el T4, esto se condice con la ausencia de diferencias significativas obtenidas en el rendimiento (Cuadro 2).

La restricción hídrica habría inducido en el T50 un retraso en la caída de la fruta (masa seca en suelo, Cuadro 2) respecto al T150, esto podría deberse a que el desprendimiento de la avellana del involucro requeriría de presión de turgor celular, lo cual disminuiría a causa de la falta de riego induciendo así un retraso en la caída de la fruta. Debido a que la avellana alcanza su tamaño definitivo entre fines de enero y principios de febrero (Ellena, 2018) y se cosecha desde el suelo, un estrés hídrico previo a la cosecha seguido por una restitución del riego podría inducir una caída más homogénea de la fruta, esto requiere ser validado, además es importante monitorear el proceso de inducción de la flor femenina que ocurre entre enero y principios de febrero (Ellena, 2018) dado que un estrés durante este proceso comprometería la producción al año siguiente.

No se encontraron diferencias significativas en la relación masa semilla/masa avellana (Cuadro 2) lo que se condice con lo obtenido por Ortega – Farias *et al.* (2020), además los porcentajes obtenidos se encuentran dentro de los rangos para la variedad (Ellena, 2018). El T50 redujo el diámetro de la avellana respecto al T100 y al T150 (Cuadro 2), mientras que en el diámetro de semilla solo hubo diferencias significativas entre el T50 y el T150, dado que el T100 habría sufrido un estrés hídrico leve durante la temporada, el efecto de este sobre el diámetro de la semilla debiera continuar siendo estudiado. Finalmente, no hubo diferencias significativas en el porcentaje de avellanas sin semilla, lo que se condice con los resultados de Bignami *et al.* (2000).

CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones en que se llevó a cabo esta investigación, se concluye que:

Los sensores de flujo de savia pueden ser una opción para estimar la transpiración de avellano europeo bajo condiciones de campo, estos mostraron sensibilidad a las variaciones climáticas y al contenido de agua en el suelo.

Las mediciones de potencial hídrico xilemático a medio día solar indicaron que el T50 sufrió estrés, el T100 habría sufrido un estrés leve en la temporada y el T150 se habría mantenido en buena condición hídrica.

Los resultados de densidad de flujo de savia (V_s) mostraron la sensibilidad del avellano al DPV, donde se observó el comienzo de la reducción en la tasa transpirativa a los 1.46 kPa, acentuándose entre los 2.2 y 2.6 kPa.

La línea base desarrollada puede ser utilizada como criterio de control de la condición hídrica del avellano. En la literatura no existen curvas de este tipo para la especie, solo valores umbrales, por lo cual es importante continuar con el desarrollo de esta estableciendo ensayos sobre condiciones diferentes al de la presente tesis.

Las mediciones de $K_{cb\ fc}$ mostraron ser una opción simple y de bajo costo para la estimación de K_{cb} bajo condiciones no limitantes de agua, arrojando valores entre 0.69 y 0.76. El uso de SFS por su parte permite el ajuste de K_{cb} bajo condiciones limitantes y particulares de cada huerto, demostrando así una aplicabilidad directa hacia la programación de riegos.

El estrés inducido al T50 redujo el diámetro de avellana y semilla, pero no tuvo efectos significativos en el rendimiento, por lo que es importante continuar estudiando los efectos del estrés hídrico en el rendimiento de esta especie dada la sensibilidad a este reportada en la literatura.

LITERATURA CITADA

- Ahumada-Orellana, L., S. Ortega-Farías, C. Poblete-Echeverría, and P. S. Searles. 2019. Estimation of stomatal conductance and stem water potential threshold values for water stress in olive trees (cv. Arbequina). *Irrigation Science*, 37: 461-467.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- 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. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Anderson, R. G., J. G. Alfieri, R. Tirado-Corbalá, J. Gartung, L. G. McKee, J. H. Prueger, D. Wang, E. James, J. E. Ayars, and W. P. Kustans. 2017. Assessing FAO-56 dual crop coefficients using eddy covariance flux partitioning. *Agriculture Water Manage.* 179 (Jan): 92–102.
- Barrett D. J., T. J. Hatton, J. E. Ash, and M. C. Ball. 1995. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of South-Eastern Australia. *Plant Cell Environ*, 18: 463–469.
- Becker, P. 1998. Limitations of a compensation heat pulse velocity system at low sap flow: implications for measurements at night and in shaded trees, *Tree Physiology*, 18(3): 177–184.
- Beyá-Marshall, V., E. Arcos, Ó. 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.
- Bigنامي, C., C. Cammilli, G. Moretti, and F. Romoli. 2000. Irrigation of *Corylus avellana* L.: Effects on canopy development and production of young plants. *Acta Horticulturae*, 537: 903–910.
- Blanco, V., R. Domingo, A. Pérez-Pastor, P. J. Blaya-Ros, and R. Torres-Sánchez. 2018. Soil and plant water indicators for deficit irrigation management of field-grown sweet cherry trees. *Agricultural water management*, 208: 83-94.
- Burgess, S.S.O., M.A. Adams, N.C. Turner, C.R. Beverly, C.K. Ong, A.A.H. Khan, and T.M. Bleby. 2001. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology* 21: 589–598.
- Callejas R., J. Vera, C. Kremer, J. Covarrubias, C. Benavides, y M. Rioseco. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo, Serie Ciencias Agronómicas N° 23. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Cincera, I., T. Frioni, V. Ughini, S. Poni, D. Farinelli, and S. Tombesi. 2019. Intra-specific variability of stomatal sensitivity to vapour pressure deficit in *Corylus avellana* L.: A candidate factor influencing different adaptability to different climates?. *Journal of plant physiology* 232: 241-247.

- CIREN. 1997. Estudio Agrologico VII Región: Descripciones de suelos. Publicación CIREN N°117. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Chile.
- Corell González, M., D. Pérez López, M. J. Martín Palomo, A. Centeno, A. Galindo, M. M. Moreno, C. Moreno, H. Memmi, F. Moreno, A. Moriana, I. Girón, and A. Torrecillas Melendreras. 2016. Comparison of the water potential baseline in different locations. Usefulness for irrigation scheduling of olive orchards. *Agricultural Water Management*, 177: 308-316.
- Cristofori, V., R. Muleo, C. Bignami, and E. Rugini. 2014. Long term evaluation of hazelnut response to drip irrigation. In VIII International Congress on Hazelnut 1052: 179-185.
- Deloire, A., A. Carbonneau, Z. Wang, and H. Ojeda. 2004. Vine and water: a short review. *OENO One*, 38(1): 1-13.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2020. InfoStat versión 2020e. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Ellena, M. 2013. Avellano Europeo: establecimiento y formación de la estructura productiva. Instituto de Investigaciones Agropecuarias - centro regional INIA Carillanca. Vilcún. Región de la Araucanía, Chile.
- Ellena, M., 2018. El avellano europeo en Chile. Una década de recopilación e investigación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Temuco, Región de la Araucanía, Chile.
- Fereres, E., and D. Goldhamer. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78(2): 139-144.
- Fernández, J. E., S. R. Green, H. W. Caspari, A. Diaz-Espejo, and M. V. Cuevas. 2008. The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines. *Plant and Soil*, 305(1): 91-104.
- Ferreira, M. I., J. Silvestre, N. Conceicao, and A. C. Malheiro. 2012. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Irrigation Science* 30 (5): 433–447.
- Gálvez, R., R. Callejas, G. Reginato, and M. C. Peppi. 2014. 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.
- Grau, P., and P. Sandoval. 2009. Xylematic water potential and stomata density in three cultivars of hazelnut (*Corylus avellana* L.) in Region del Bio Bio, Chile. *Acta Horticulturae*, 845: 249–254.
- Hatton, T. J., E. A. Catchpole, and R. A. Vertessy. 1990. Integration of sapflow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiology*, 6(2): 201–209.
- Li, S., M. Feifel, Z. Karimi, B. Schuldt, B. Choat, and S. Jansen. 2015. Leaf gas exchange performance and the lethal water potential of five European species during drought. *Tree physiology*, 36(2): 179-192.

- Lide, D.R. 1992. Handbook of chemistry and physics, 73th edition. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida, USA.
- Mačkić, K., B. Pejić, M. Belić, D. Janković, and L. Pavlović. 2016. Hazelnut (*Corylus avellana* L.) response to microsprinkler irrigation in climatic conditions of Vojvodina province. *Research journal of agricultural science*, 48(1).
- Marino, G., T. Caruso, L. Ferguson, and F. P. Marra. 2018. Gas exchanges and stem water potential define stress thresholds for efficient irrigation management in olive (*Olea europea* L.). *Water*, 10(3): 342.
- Marsal, J., M. Gelly, M. Mata, A. Arbonés, J. Rufat, and J. Girona. 2002. Phenology and drought affects the relationship between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77(4): 411–417
- Marshall, D. C. 1958. Measurement of Sap Flow in Conifers by Heat Transport. *Plant physiology*, 33(6): 385–396.
- McCutchan, H., and K. A. Shackel. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117(4): 607-611.
- O’Connell, M. G., and I. Goodwin. 2007. Responses of ‘Pink Lady’ apple to deficit irrigation and partial rootzone drying: Physiology, growth, yield, and fruit quality. *Australian Journal of Agricultural Research* 58 (11): 1068–1076.
- ODEPA. 2022. Superficie plantada nacional, regional, número de huertos e infraestructura frutícola. Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA). Santiago, Chile. Disponible en <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2022/12/Sup-plantada-nacional01.12.2022.xlsx> (consultado en febrero de 2023)
- Olivo, N., J. Girona, and J. Marsal. 2009. Seasonal sensitivity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrigation Science*, 27:175–182.
- Ortega-Farias, S., E. Villalobos-Soublett, C. Riveros-Burgos, M. Zúñiga, and L.E. Ahumada-Orellana. 2020. Effect of irrigation cut-off strategies on yield, water productivity and gas exchange in a drip-irrigated hazelnut (*Corylus avellana* L. cv. Tonda di Giffoni) orchard under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 238, 106173.
- Pasqualotto, G., V. Carraro, R. Menardi, and T. Anfodillo, 2019. Calibration of Granier-Type (TDP) sap flow probes by a high precision electronic potometer. *Sensors*, 19(10): 2419.
- Pasqualotto, G., V. Carraro, S. Conati, C. Chloé, G. Salaün, M. Mercadal, and T. Anfodillo. 2018. Stomatal sensitivity in *Corylus avellana* (L.): first analysis from a global dataset. In IX International Congress on Hazelnut 1226: 181-188.
- Patakas A., B. Noitsakis, and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture. Ecosystems. Environment*. 106(2-3): 253-259.

- Poblete-Echeverría, C., and S. Ortega-Farías. 2013. Evaluation of single and dual crop coefficients over a drip-irrigated Merlot vineyard (*Vitis vinifera* L.) using combined measurements of sap flow sensors and an eddy covariance system. *Australian journal of grape and wine research*, 19(2): 249-260.
- Poblete-Echeverría, C., S. Ortega-Farías, M. Zuñiga, and S. Fuentes. 2012. Evaluation of compensated heat-pulse velocity method to determine vine transpiration using combined measurements of eddy covariance system and microlysimeters. *Agricultural water management* 109: 11-19.
- Rafi, Z., O. Merlin, V. Le Dantec, S. Khabba, P. Mordelet, S. Er-Raki, A. Amazirh, L. Olivera-Guerra, B. Ait Hssaine, V. Simonneaux, J. Ezzahar, and F. Ferrer. 2019. Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Intercomparing eddy covariance, sap flow, lysimeter and FAO-based methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 265: 310-326.
- Saitta, D., D. Vanella, J. M. Ramírez-Cuesta, G. Longo-Minnolo, F. Ferlito, and C. Simona. 2020. Comparison of orange orchard evapotranspiration by Eddy Covariance, Sap flow, and FAO-56 Methods under Different Irrigation Strategies. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146 (7)
- Sandoval, M., J. Dörner, Ó. Seguel, J. Cuevas, y D. Rivera. 2012. *Métodos de Análisis Físicos de Suelos*. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Chillan, Chile.
- Sellés, G., R. Ferreira, y P. Maldonado. 2002. Cámara de presión: instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. *Aconex*, 76: 18-22.
- Shackel, K., H. Ahmadi, W. Biasi, R. Buchner, D. Goldhamer, S. Gurusinge, 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, and J. Yeager. 1997. Plant Water Status as an Index of Irrigation Need in Deciduous Fruit Trees, *HortTechnology horttech*, 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. 2011. A Plant-based Approach to Deficit Irrigation in Trees and Vines, *HortScience horts*, 46(2): 173-177
- Shackel, K., A. Moriana, G. Marino, M. Corell, D. Pérez-López, M. Martín-Palomo, T. Caruzo, F. Marra, L. Agüero, 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. *Frontiers in Plant Science* 12: 791711.
- Williams, L. E., and P. Baeza. 2007. Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *American journal of enology and viticulture*, 58(2): 173-181.

- Williams, L. E., and T.J. Trout. 2005. Relationships among vine-and soil-based measures of water status in a Thompson Seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(4): 357-366.
- Zhao, L., and W. Zhao. 2014. Canopy transpiration obtained from leaf transpiration, sap flow and FAO-56 dual crop coefficient method. *Hydrological Processes*, 29(13): 2983-2993.
- Zúñiga, M., S. Ortega-Farías, and C. Poblete-Echeverría. 2012. Use of sap flow sensors to determine transpiration of a young drip-irrigated olive orchard ('Arbequina') under semi-arid conditions. In VII International Symposium on Olive Growing 1057: 405-410.

ANEXO 1

El suelo presenta clase textural franco arcillosa en superficie y arcillosa en profundidad, sobre un duripán de textura franco arenosa; se observan vaciamientos y concreciones de manganeso, signos de problemas de drenaje y la profundidad efectiva varía de ligeramente profunda a moderadamente profunda.

Cuadro 3. Descripción de suelo del sitio de estudio.

Profundidad (cm)	Propiedades morfológicas
0 - 25 A _{1p}	Pardo oscuro (7,5YR 3/3), Pardo (10YR 5/3) en seco; franco arcilloso, muy plástico, moderadamente adhesivo; bloques subangulares, medios y finos moderados y gruesos fuertes, firmes; raíces medias y finas comunes, gruesas pocas; poros finos y medios abundantes, gruesos comunes; límite lineal claro. Se observa enmienda de capotillo
25 - 45 A _{2pc}	Pardo oscuro (7,5YR 3/2), Pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco; franco arcilloso, muy plástico, moderadamente adhesivo; bloques subangulares, medios, finos y gruesos moderados firmes; raíces finas comunes, medias abundantes, gruesas pocas; poros medios y finos abundantes, gruesos pocos; vaciamientos gruesos comunes; límite lineal abrupto.
45-95 Bt	Pardo oliva (2,5Y 4/3), Gris pardusco claro (10YR 6/2) en seco; arcilloso, muy plástico, ligeramente adhesivo; bloques subangulares, gruesos débiles, muy firmes; raíces finas pocas y medias comunes; poros finos y medios pocos; se observan concreciones de manganeso; límite lineal abrupto.
95 o más B/Csm	Duripán, Franco arenoso.

Cuadro 4. Propiedades físicas de suelo

Profundidad (cm)	Clase textural	Da (gr cm ⁻³)	Dr (gr cm ⁻³)	S (cm ³ cm ⁻³)	CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)
0-25	FA	1.11	2.43	0.54	0.31	0.19
25-45	FA	1.27	2.51	0.49	0.33	0.21
45-95	A	1.46	2.47	0.41	0.42	0.35
Duripán	Fa	1.70	2.63	0.35	-	-

ANEXO 2

Cuadro 5. Coeficientes de corrección por efecto de la herida. Fuente: adaptado de Burgess *et al.* (2001).

Herida (cm)	b	c	d
Configuración -0.5, 0, 0.5			
0.17	1.6821	-0.0015	0.0002
0.18	1.7304	-0.0013	0.0002
0.19	1.7961	-0.0016	0.0002
0.20	1.8558	-0.0018	0.0003
0.21	1.9181	-0.0021	0.0003
0.22	1.9831	-0.0024	0.0004
0.23	2.0509	-0.0028	0.0004
0.24	2.0973	-0.003	0.0005
0.26	2.2231	-0.0037	0.0006
0.28	2.376	-0.0046	0.0008
0.30	2.5232	-0.0055	0.001
Configuración -0.6, 0, 0.6			
0.17	1.6565	-0.0014	0.0002
0.18	1.7077	-0.0014	0.0002
0.19	1.7701	-0.0017	0.0002
0.20	1.8292	-0.0019	0.0003
0.21	1.8909	-0.0022	0.0003
0.22	1.9554	-0.0025	0.0004
0.23	2.0226	-0.0029	0.0004
0.24	2.0685	-0.0031	0.0005
0.26	2.1932	-0.0038	0.0006
0.28	2.3448	-0.0047	0.0008
0.30	2.4908	-0.0057	0.001

ANEXO 3**Cuadro 6.** Propiedades de la madera. Fuente: elaboración propia.

Variable	n	Media	D. E.	C. V.	Mín.	Máx.
Diámetro de tronco (cm)	8	3.97	1.39	35.1	2.62	5.72
Densidad de la madera fresca (kg m ⁻³)	8	506.47	204.95	40.47	316.32	780.83
Contenido de agua de la albura (kg kg ⁻¹)	8	1.14	0.05	4.71	1.09	1.23

Cuadro 7. Diámetro de fustes y área de albura total de unidades observacionales con sensores de flujo de savia. Fuente: elaboración propia.

Tratamiento	Diámetro fustes (cm)	Área de albura fuste (cm ²)	Área de albura total (cm ²)
T150	4.20	10.78	36.67
	4.64	13.81	
	4.40	12.08	
T100	4.26	11.13	29.33
	3.82	8.67	
	3.99	9.54	
T50	3.94	9.31	30.32
	4.06	9.96	
	4.24	11.04	

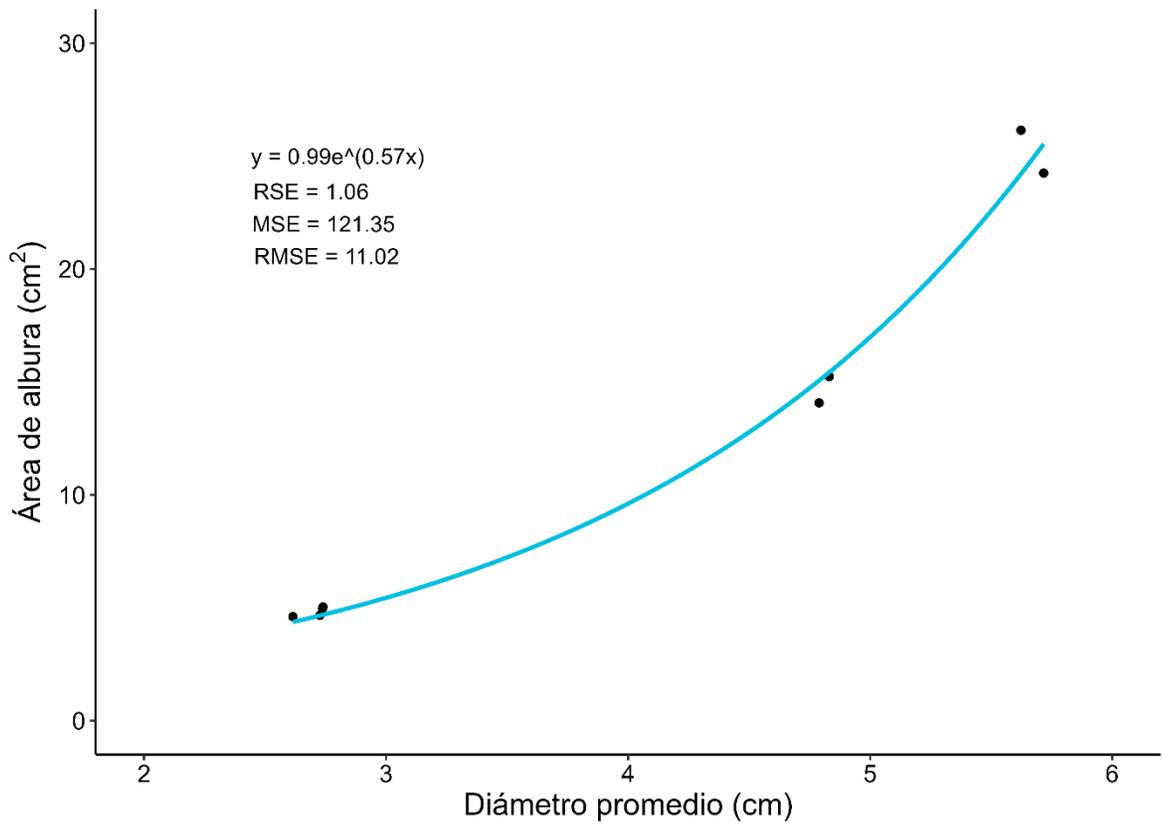


Figura 10. Relación entre el área de albura conductora (cm²) y el diámetro promedio de tronco (cm).

ANEXO 4

Distribución del bulbo T50

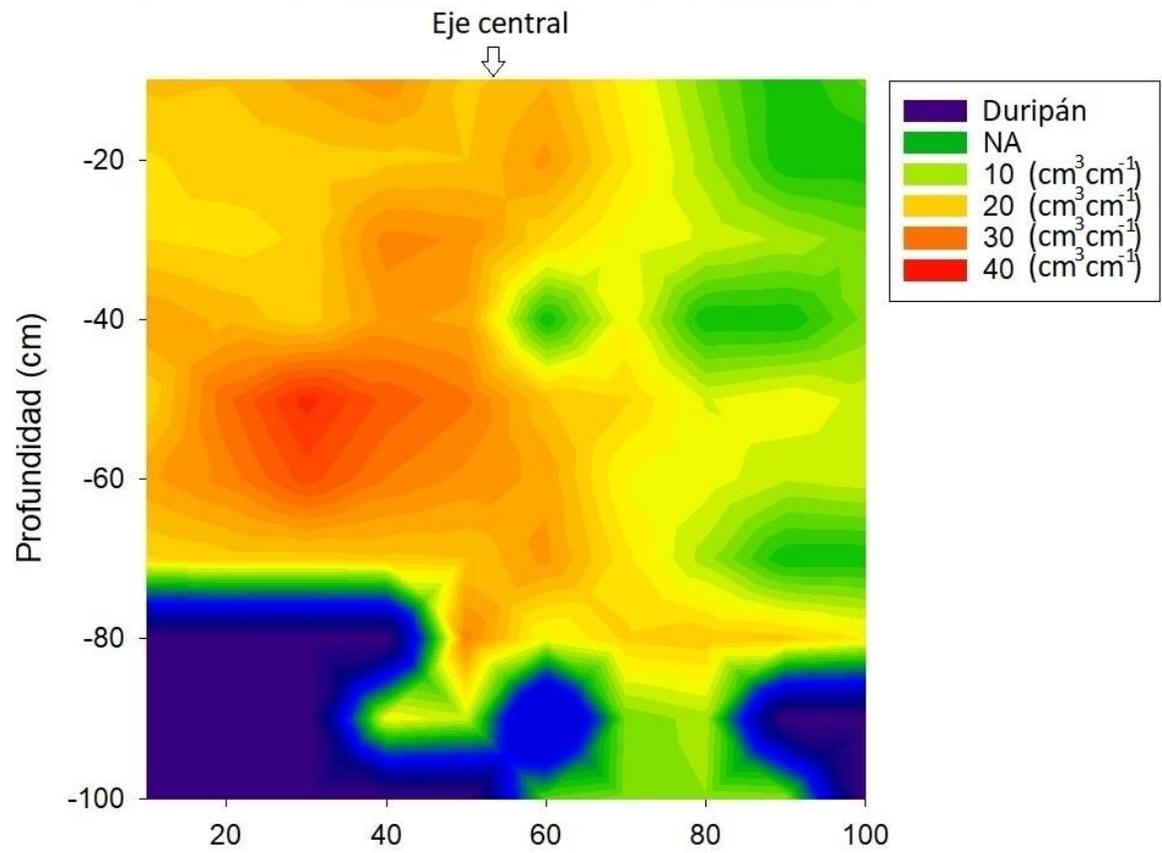


Figura 11. Distribución del bulbo de mojamiento (03/02/2022) para el T50.

Distribución del bulbo T100

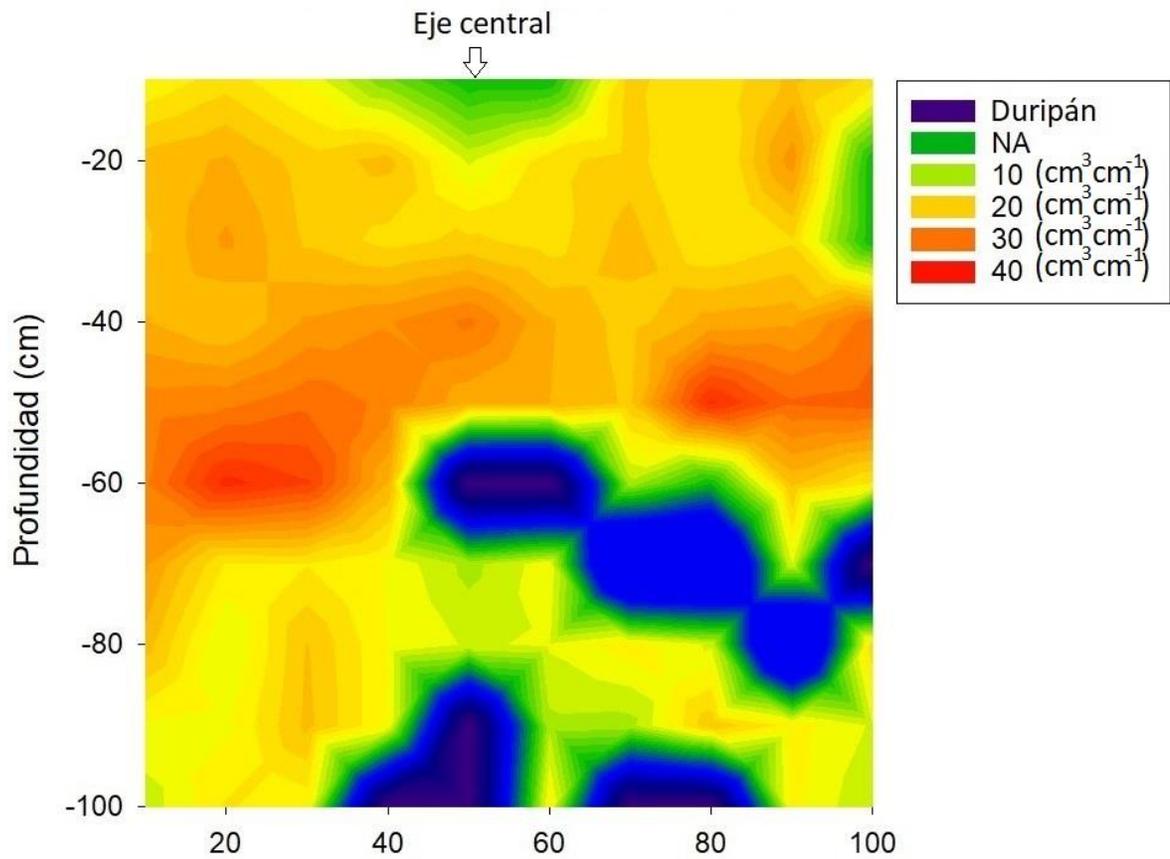


Figura 12. Distribución del bulbo de mojado (03/02/2022) para el T100.

Distribución del bulbo T150

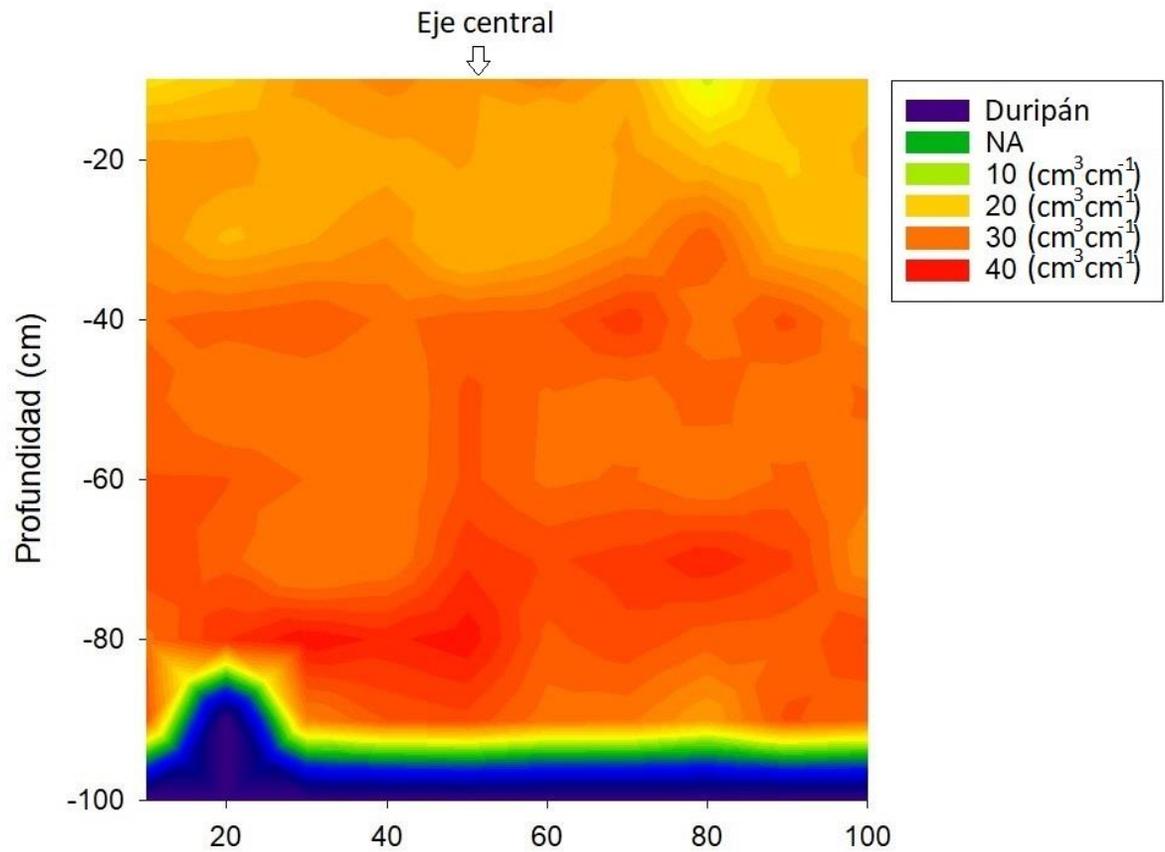


Figura 13. Distribución del bulbo de mojado (03/02/2022) para el T150.