



# UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

## DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO PRÁCTICO (Kcs) EN UN HUERTO DE CHIRIMOYO (*Annona cherimola* MILL.), BASADO EN EL USO DE SONIDAS DE CAPACITANCIA FDR

AFE para optar al Título de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en  
Ciencias Agropecuarias mención Producción Frutícola

**ESTEBAN JESÚS GÁRATE CORTÉS**

Director de AFE  
RODRIGO CALLEJAS RODRÍGUEZ

Profesores consejeros  
CLAUDIO PASTENES VILLARREAL  
THOMAS FICHET LAGOS

SANTIAGO - CHILE  
2021

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

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO PRÁCTICO  
(Kcs) EN UN HUERTO DE CHIRIMOYO (*Annona cherimola* MILL.),  
BASADO EN EL USO DE SONIDAS DE CAPACITANCIA FDR**

AFE presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias mención  
Producción Frutícola

**ESTEBAN JESÚS GÁRATE CORTÉS**

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
<b>DIRECTOR DE AFE</b>		
Rodrigo Callejas Rodríguez	7,0	6,5
Ingeniero Agrónomo, Dr. Sc. Agr.		
<b>PROFESORES CONSEJEROS</b>		
Claudio Pastenes Villarreal	6,7	6,7
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.		
Thomas Fichet Lagos	6,8	6,8
Ingeniero Agrónomo, Dr.		

Santiago, Chile  
2021

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO PRÁCTICO ( $K_{cs}$ ) EN UN HUERTO DE CHIRIMOYO (*Annona cherimola* MILL.), BASADO EN EL USO DE SONDAS DE CAPACITANCIA FDR

DETERMINATION OF THE PRACTICAL CROP COEFFICIENT ( $K_{cs}$ ) IN A CHERIMOYA ORCHARD (*Annona cherimola* MILL.), BASED ON THE USE OF FDR CAPACITANCE PROBES

## **AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA**

Agradecer a todos quienes hicieron posible esta investigación, en especial al profesor Rodrigo Callejas, Roberto Hernández, Ismael Tomielis y al personal de Agrícola H.C. Ltda. quienes siempre dispusieron de tiempo y apoyo para realizar este trabajo.

A mis compañeros de universidad Aris Villarruel, Rodrigo Reyes y Fernando Quezada, que me apoyaron y dieron una ayuda siempre que la necesité.

Finalmente, al grupo de amigos que formé durante mis años de estudio, Matías Aguilar, Matías Henríquez, María Ignacia Farias, Juan Pablo Contreras y Luis Urrutia, quienes hicieron grato cada momento.

Esta tesis está dedicada a mi familia, quienes me apoyaron incondicionalmente durante todo este recorrido, en especial a mi madre, mi padre, mi hermana y abuelos.

**ÍNDICE**

RESUMEN.....	10
ABSTRACT .....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos .....	14
MATERIALES Y MÉTODOS .....	15
Ubicación del estudio.....	15
Material biológico .....	15
Tratamientos y diseño experimental .....	16
Manejo del experimento.....	17
Evaluaciones .....	18
Evaluaciones generales .....	18
Evaluaciones de riego .....	18
Evaluaciones a nivel de planta .....	19
Caracterización de la cobertura vegetal .....	20
Generación de índices de eficiencia.....	21
Análisis estadístico.....	22
RESULTADOS.....	23
Evaluaciones generales .....	23
Evaluaciones de riego .....	27
Evaluaciones a nivel de planta .....	39
Caracterización de la cobertura vegetal .....	44
Generación índices de eficiencia.....	47
DISCUSIÓN .....	49
CONCLUSIONES .....	55
LITERATURA CITADA.....	56
APÉNDICE I.....	63

APÉNDICE II .....	64
APÉNDICE III .....	65
APÉNDICE IV .....	66

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de Kc para chirimoyos sugeridos para la zona de Quillota por Gardiazábal y Rosenberg (1993), y modificados por el campo. ....	16
Cuadro 2. Líneas de Gestión de riego usando sondas de capacitancia (Callejas <i>et al.</i> , 2014). ....	17
Cuadro 3. Propiedades del suelo. ....	23
Cuadro 4. ETo acumulada por semana desde deshoje y poda hasta fin de temporada 2019. ....	25
Cuadro 5. ETo acumulada por semana desde deshoje y poda hasta fin de temporada 2020. ....	26
Cuadro 6. Riego en ambos tratamientos durante las temporadas 2019 y 2020. ....	35
Cuadro 7. Funciones para determinar el Kcs a partir de los °DG o los DPB, con información obtenida de la temporada 2020. ....	38
Cuadro 8. Promedio de flores polinizadas y frutos a cosecha por tratamiento durante las temporadas 2019 y 2020. ....	41
Cuadro 9. Rendimiento por tratamiento durante las temporadas 2019 y 2020. ....	41
Cuadro 10. Variación del ASTT en los tratamientos durante las temporadas 2019 y 2020. ....	43
Cuadro 11. Peso promedio poda y coeficiente de variación por tratamientos en la temporada 2019. ....	44
Cuadro 12. Promedio valores SPAD al momento de cosecha durante las temporadas 2019 y 2020. ....	44
Cuadro 13. Promedio PARI y fPAR en julio 2019. ....	45
Cuadro 14. Funciones entre parámetros de caracterización de la cobertura vegetal para la temporada 2020. ....	46
Cuadro 15. Funciones entre NDVI promedio y Kcs 2020 para tres periodos en la temporada. ....	47
Cuadro 16. EUAr por tratamiento en las temporadas 2019 y 2020. ....	47
Cuadro 17. Ahorro en costos asociados a electricidad en Ts. ....	47
Cuadro 18. Relaciones productivas en tratamientos en las temporadas 2019 y 2020. ....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del huerto de chirimoyos “Concha Lisa”, La Serena. ....	15
Figura 2. Esquema del diseño experimental en chirimoyos “Concha Lisa”, La Serena. .....	16
Figura 3. Perfil del suelo en chirimoyos “Concha Lisa” para observación de raíces. ....	23
Figura 4. ETo, temperatura media y °DG acumulados desde polinización durante la temporada 2019 (a) y durante la temporada 2020 (b). ....	24
Figura 5. Estimación de la duración y acumulación de °DG de los estados fenológicos para todo el periodo (media de ambas temporadas). ....	27
Figura 6. Ciclos de riego definido por sonda de capacitancia en Ts según sus Líneas de Gestión (a y b) y en To por la ETo-Kc (c y d), en IRRIMAX Live.....	28
Figura 7. Gráfico apilado del contenido de agua en el suelo para cada sensor durante la temporada 2019, en los tratamientos To (a) y Ts (b). ....	29
Figura 8. Gráfico apilado del contenido de agua en el suelo para cada sensor durante la temporada 2020, en los tratamientos (a) To y Ts (b). ....	29
Figura 9. Gráfico apilado para la determinación del tiempo de riego en Ts, el 31 de julio de 2020. ....	30
Figura 10. Contenido volumétrico (%) de agua en el suelo, evaluado con TDR150 desde la superficie (vástago de 20 cm) en agosto 2019; To (a) y Ts (b), así como en marzo de 2020; To (c) y Ts (d). En el recuadro derecho se indica una escala de referencia (%) para cada gráfico. ....	31
Figura 11. Curso temporal del riego, la precipitación, el cambio del contenido de agua volumétrico y la percolación en To (a) y en Ts (b), durante la temporada 2019. ....	33
Figura 12. Curso temporal del riego, la precipitación, el cambio del contenido de agua volumétrico y la percolación en To (a) y en Ts (b) durante la temporada 2020. ....	34
Figura 13. Comparación de agua de riego acumulada en ambos tratamientos durante las temporadas 2019 y 2020. ....	35
Figura 14. Acumulación de ETo, ETc (Durán-Zuazo <i>et al.</i> , 2019), riego en To y Ts, en cada temporada.....	36
Figura 15. Kcs promedio - percentil 70 por mes (a) y por °DG acumulados desde polinización (b) para ambas temporadas, determinado con información obtenida en Ts. Barras verticales corresponden a percentil 70. ....	37

Figura 16. Kcs de la temporada 2020 y diferentes Kc propuestos para <i>Annona cherimola</i> Mill. ....	38
Figura 17. Consumo diario normalizado en el suelo en To (a) y en Ts (b). Media de las repeticiones. Barras verticales corresponden a la desviación estándar. ....	39
Figura 18. Zona de mayor consumo de agua o actividad por tratamiento en chirimoyos. ....	40
Figura 19. Distribución de tamaños de frutos cosechados entre tratamientos durante la temporada 2019. ....	42
Figura 20. Distribución de tamaños de frutos cosechados entre tratamientos durante la temporada 2020. ....	43
Figura 21. Valores NDVI promedio por mes durante las temporadas 2019 y 2020. ....	45

## RESUMEN

La falta de estudios e información acerca del cultivo del chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.), ha dificultado el avance en la optimización de sus manejos, principalmente en el área del riego. Valores de coeficiente de cultivo se han determinado sólo en España, a pesar de ser una especie con presencia en diversos países. Esta información es relevante, al querer incrementar el uso eficiente del agua de riego en los huertos, sobre todo en periodos de sequía como el que se está viviendo en Chile y en varias partes del mundo. Es por eso que se planteó el objetivo de determinar el coeficiente de cultivo práctico (Kcs) basado en el uso de sondas de capacitancia FDR. Durante las temporadas 2019 y 2020, se ejecutaron dos tratamientos: To testigo, basado en la metodología FAO-56 Penman-Monteith y un Kc sugeridos para la zona de Quillota por Gardiazábal y Rosenberg (1993) y Ts, tratamiento sonda de capacitancia, basado en la evolución del contenido de agua en el suelo interpretado a través de las Líneas de Gestión. Se evaluaron parámetros productivos, de riego y de eficiencia hídrica. Los rangos de valor promedio y percentil 70 de coeficiente de cultivo práctico fueron 0,43-0,47; 0,66-0,73 y 0,43 para los periodos de floración, cuaja a inicio de crecimiento de fruto y crecimiento de fruto a cosecha. Los rendimientos y calidad de la fruta fueron similares durante ambas temporadas, pero no la cantidad total de agua de riego aplicada en el primer año, equivalentes a 5.916 y 5.169 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, para To y Ts, respectivamente y de 4.255 y 3.346 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, para To y Ts en el segundo año de estudio. Se detectaron diferencias significativas en la eficiencia del uso de agua de riego para cada temporada, alcanzando 2,9 y 3,8 kg m<sup>-3</sup> en To y 3,8 y 6,4 kg m<sup>-3</sup> en Ts, logrando aumentar hasta un 68% la eficiencia mediante el uso de sondas de capacitancia FDR.

**Palabras clave:** EUAr, riego eficiente, sensor TDR.

**ABSTRACT**

The lack of studies and information about the cultivation of cherimoya trees (*Annona cherimola* Mill.), has hindered progress in the optimization of its management, mainly in the irrigation area. Crop coefficient values have been determined only in Spain, despite being a specie with presence in various countries. This information is relevant, by wanting to increase the efficient use of irrigation water in orchards, especially in periods of drought such as that being lived in Chile and most of the world. That is why the objective of determining the practical crop coefficient (Kcs) based on the use of FDR capacitance probes was set. During the 2019 and 2020 seasons, two treatments were performed: To control, based on the FAO-56 Penman-Monteith methodology and a Kc suggested for the Quillota area by Gardiazábal and Rosenberg (1993) and Ts, capacitance probe treatment, based on the soil water content evolution in the soil interpreted using Management Lines. Productive, irrigation and water efficiency parameters were evaluated. The average value and 70th percentile ranges of practical crop coefficient was 0,43-0,47; 0,66-0,73 and 0,43 for flowering, fruit set to the beginning of fruit growth and fruit growth to harvest periods. Fruit yield and quality were similar during both seasons, but not the amount of irrigation water applied in the first year, equivalent to 5,916 and 5,169 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, for To and Ts, respectively and 4,255 and 3,346 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, for To and Ts in the second year of study. Significant differences in irrigation water use efficiency were detected for each season, reaching 2,9 and 3,8 kg m<sup>-3</sup> in To and 3,8 and 6,4 kg m<sup>-3</sup> in Ts, achieving increase up to 68% efficiency using FDR capacitance probes.

**Keywords:** Irrigation efficiency, TDR sensor, WUEi.

## INTRODUCCIÓN

El principal productor de chirimoyas en el mundo es España (Galán Sauco *et al.*, 2014; Larranaga *et al.*, 2017), país que cuenta con una superficie plantada de 2.402 ha y una producción anual de 43.645 ton año<sup>-1</sup> (MAPA, 2019). Lo sigue Perú, con 2.905 ha de este frutal y una producción anual de 20.505 ton año<sup>-1</sup> (SIEA, 2018), presentando menores rendimientos promedios que España. En Chile, es un cultivo con una superficie nacional de 404,8 ha, de las cuales 285 ha se encuentran en la Región de Coquimbo, superficie que ha ido disminuyendo a una tasa de -5% entre los años 2015 a 2018, principalmente en La Serena, al ser ocupado sus suelos por la construcción de casas y edificios. En el año 2018, la producción alcanzó las 3.734,4 ton año<sup>-1</sup> (CIREN y ODEPA, 2018).

La Región de Coquimbo presenta un déficit hídrico que ha durado más de 10 años (MOP, 2019), con un déficit del 40% de las precipitaciones con respecto del promedio histórico para la Región, durante el año 2020. Según la DGA (2020), los embalses terminaron el año 2020 con volúmenes que variaron entre un 14% y 83% de su capacidad máxima, producto de la disminución de las precipitaciones y de los caudales de los ríos. Específicamente el embalse Puclaro, ubicado en Elqui y destinado su volumen almacenado para agua de riego en agricultura, el cual terminó el año con un 58% de su capacidad.

Cifuentes y Meza (2008), señalan que esto empeorará por el cambio climático, proyectándose para todo Chile que las temperaturas serán más cálidas de lo actual y que en una buena parte de su territorio se observarán disminuciones en la disponibilidad de agua. Para la ciudad de La Serena, se proyecta para el año 2050 un aumento promedio de la temperatura de 2°C y una disminución de las precipitaciones en un 12,7% (Santibáñez *et al.*, 2016). Además, el aumento por cada 1°C tendrá consecuencias sobre el número de días con temperaturas extremadamente altas y la evapotranspiración tenderá al alza, aumentando los requerimientos de riego. Se proyecta, que la demanda de agua de riego se incrementará entre un 5 a 8% por cada grado de aumento en la temperatura, lo que en una temporada podría significar una demanda adicional de agua de hasta 800 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (Santibáñez, 2016). Por tales razones, es imprescindible poder optimizar el uso de este recurso, cada vez más escaso.

Es común que en zonas con baja disponibilidad hídrica se utilicen sistemas de riego tecnificado, como lo son el riego por goteo o aspersión, dado la mayor eficiencia y la disminución en el volumen de agua de riego que es requerida (Hussein *et al.*, 2008). En la Región de Coquimbo, el principal sistema de riego ocupado en frutales es el tecnificado por goteo, utilizándose en el 93,3% de la superficie plantada. En los huertos de chirimoyo este sistema está presente en el 89,6% de estos (CIREN y ODEPA, 2018).

En cuanto a la metodología tradicional de definición del manejo del riego en los huertos tecnificados, se utiliza la determinación de la evapotranspiración de cultivo (ETc), denominada FAO-56 Penman-Monteith (Kc-ETo), que se describe de forma detallada en el manual FAO 56 (Allen *et al.*, 1998). En esta especie, el valor de Kc no está claramente definido para la realidad chilena debido a la poca investigación que existe en torno al cultivo. Sin embargo, Gardiazábal y Rosenberg (1993) propusieron valores de Kc para chirimoyos adultos ubicados en la zona de Quillota, los cuales tienen un mínimo de 0,2 para el periodo de menor consumo del árbol y 0,8 para su máximo desarrollo.

En Almuñécar, España, Rodríguez *et al.* (2011) y Duran-Zuazo *et al.* (2019), estimaron valores de Kc para el chirimoyo bajo manejo convencional en condiciones de clima mediterráneo con el uso de lisímetros de drenaje y sondas de capacitancia FDR, Diviner (Sentek<sup>MR</sup>), obteniendo ambos estudios valores promedio entre 0,62 a 0,63; 0,65 a 0,68 y 0,5 a 0,55 para las etapas de floración, cuaja y crecimiento de fruto, respectivamente.

Mediante estos estudios se puede señalar que el valor de Kc, debe ser validado en cada localidad, especie e incluso bajo manejos específicos, ya que dentro de una misma provincia de un país, se obtienen valores diferentes debido a variables de manejo del huerto, como es el marco de plantación, orientación de las hileras, tamaño y forma de la canopia, que afecten la radiación solar interceptada por el dosel de los árboles, parámetro del cual depende el Kc de la mayoría de las especies (Girona *et al.*, 2010; Domínguez-Niño *et al.*, 2020). Adicionalmente y no menos importante, toda mejora del método FAO-56 Penman-Monteith busca una alta optimización del riego que logre obtener una alta eficiencia del uso del recurso hídrico intrapredial (Sinclair *et al.*, 1984).

Modernas tecnologías, tales como el uso de sensores de suelos TDR (time domain reflectometry) y sondas de capacitancia FDR (frequency domain reflectometry), han permitido generar nuevas estrategias de riego, cada uno con sus ventajas y limitaciones. Sin embargo, se señala que son en la actualidad uno de los grandes avances tecnológicos para el control del riego en la agricultura (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005; Abioye *et al.*, 2020).

Estos instrumentos permiten realizar evaluaciones del contenido de agua a distintas profundidades de suelo, siendo de gran ayuda para enfrentar situaciones de baja disponibilidad hídrica y sequía, ya que al realizar evaluaciones constantes del contenido de agua en el perfil, se puede ajustar el tiempo y la frecuencia de los riegos según el consumo de las plantas en relación a la demanda atmosférica. De esta forma se evita la percolación profunda, logrando alcanzar una alta eficiencia del proceso y disminuir el uso anual de agua de riego (Hidalgo *et al.*, 2003; Orozco, 2010; Callejas *et al.*, 2014).

Estas nuevas estrategias, se pueden complementar con el uso de sensores remotos enmarcado en la agricultura de precisión o “agricultura 4.0”, que consiste en reconocer, localizar, cuantificar y registrar la variabilidad espacial y temporal de cada unidad agrícola (Díaz, 2015; Cisternas *et al.*, 2020). Permitiendo con ello resaltar atributos de las cubiertas vegetales utilizando índices de vegetación, siendo el NDVI uno de los más utilizados (Gandhi *et al.*, 2015). Con este índice se puede realizar un seguimiento al desarrollo de los cultivos (Balbontín *et al.*, 2016), evaluando el comportamiento de las estrategias de manejo implementadas en un huerto.

Por lo tanto, considerando la poca información respecto al chirimoyo, la implementación de sistemas sustentables en el manejo del riego (Durán-Zuazo *et al.*, 2019) y la tendencia a implementar tecnologías que permitan enfrentar la escasez hídrica de la Región de Coquimbo, se procederá a llevar a cabo un estudio basado en el uso de sensores de suelo y tecnologías complementarias (Callejas *et al.*, 2014; Abioye *et al.*, 2020). Lo anterior con el objetivo de definir un coeficiente de cultivo práctico (Kcs) para un huerto de chirimoyo y evaluar el desempeño de este frente a estas nuevas tecnologías.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Determinar el coeficiente de cultivo práctico (Kcs) en un huerto de chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.), basado en el uso de sondas de capacitancia FDR.

### **Objetivos específicos**

1. Proponer un coeficiente de cultivo práctico (Kcs) para chirimoyo, basado en el uso de sondas de capacitancia FDR.
2. Determinar y comparar la eficiencia del uso de agua de riego (EUAr) en el chirimoyo, tanto para un manejo tradicional usando riego por goteo y metodología FAO-56 Penman-Monteith, como para el método de control usando sondas de capacitancia FDR.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del estudio

El ensayo se realizó en un huerto de 2,6 ha de chirimoyos, variedad Concha Lisa ubicado en el Fundo Corazón de María (-29,9827660, -71,2259910R), perteneciente a la Sociedad Agrícola H.C. Ltda., ubicado en el sector San Ramón, La Serena, Región de Coquimbo (Figura 1), durante las temporadas 2019 y 2020. Las evaluaciones se realizaron en las mismas instalaciones de la empresa y en el Laboratorio de Viticultura de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

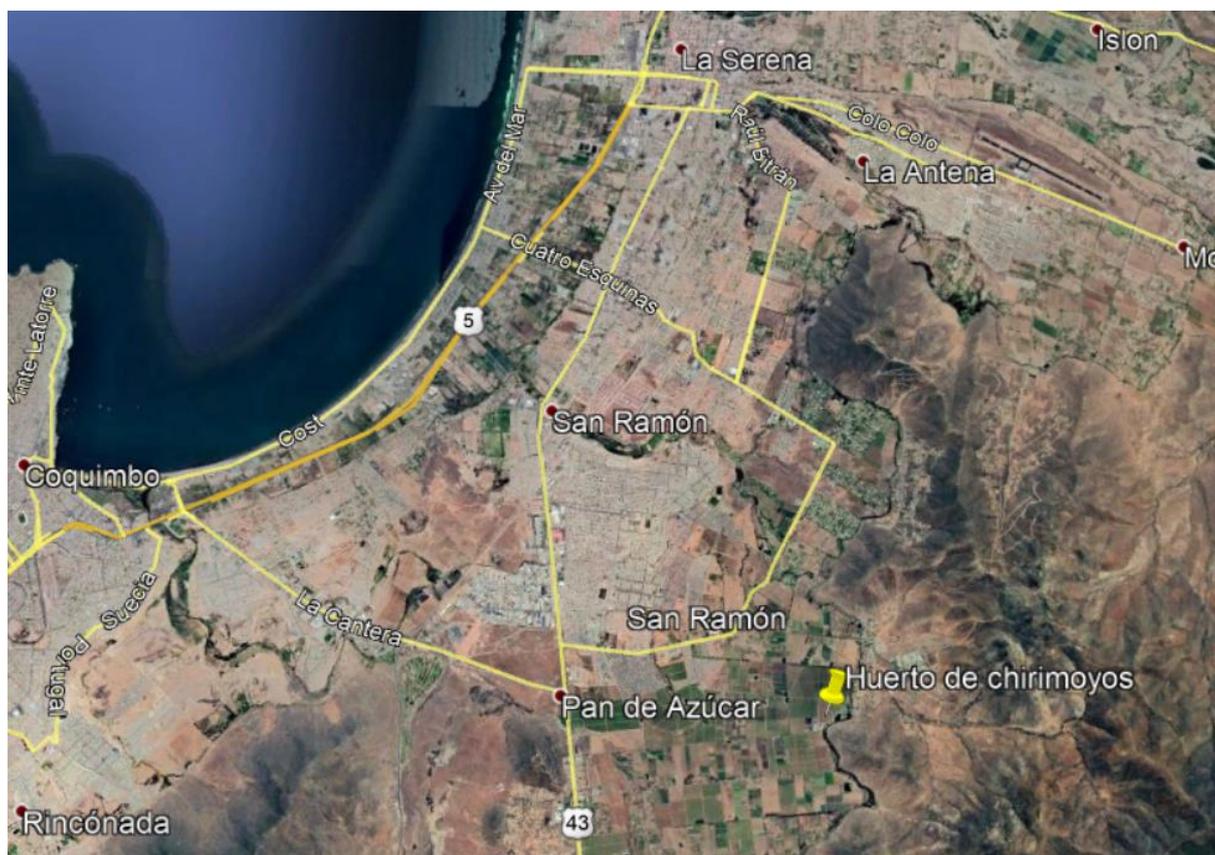


Figura 1. Ubicación del huerto de chirimoyos “Concha Lisa”, La Serena.

### Material biológico

Se utilizaron chirimoyos de 10 años representativos de la plantación. Los árboles están distribuidos en hileras en orientación norte – sur, con un marco de plantación de 5 x 2,5 metros y con formación en copa. Cuenta con riego por goteo de doble línea, con goteros cada 0,5 m y una precipitación del sistema de riego de 2,3 mm h<sup>-1</sup>. El bulbo fue bien definido y no existió movimiento de las líneas de gotero hacia la entre hilera durante la temporada de riego.

### Tratamientos y diseño experimental

Se realizó un diseño en bloques completamente al azar (DBCA) con 2 tratamientos y 5 repeticiones por tratamiento, siendo la unidad experimental (UE) un grupo de 4 plantas. El bloque correspondió a 15 árboles en la hilera cuya distribución se muestra en la Figura 2.

El tratamiento testigo campo (To) correspondió a un riego calculado por la metodología FAO-56 Penman-Monteith, utilizando valores Kc sugeridos por Gardiazábal y Rosenberg (1993) y modificados para el sector (Cuadro 1). En el tratamiento sonda de capacitancia (Ts), se ejecutó el riego ajustando la frecuencia y el tiempo según las Líneas de Gestión (LG) definidas para el uso de las sondas de capacitancia de lectura continua (Enviroscan<sup>MR</sup>), apoyado por el uso de equipo TDR150 (Spectrum Technologies) (Callejas *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Valores de Kc para chirimoyos sugeridos para la zona de Quillota por Gardiazábal y Rosenberg (1993), y modificados por el campo.

Mes	Estado fenológico	Kc	Mes	Estado fenológico	Kc
Diciembre	Inicio de brotación	0,5	Junio	Crecimiento de fruto	0,7
Enero	Floración – cuaja	0,5	Julio	Crecimiento de fruto	0,7
Febrero	Floración – cuaja – desarrollo de fruto	1,0	Agosto	Crecimiento de fruto	0,7
Marzo	Crecimiento de fruto	0,7	Septiembre	Madurez de cosecha	0,7
Abril	Crecimiento de fruto	0,8	Octubre	Postcosecha	0,7
Mayo	Crecimiento de fruto	0,7	Noviembre	Deshoje/poda	0,5

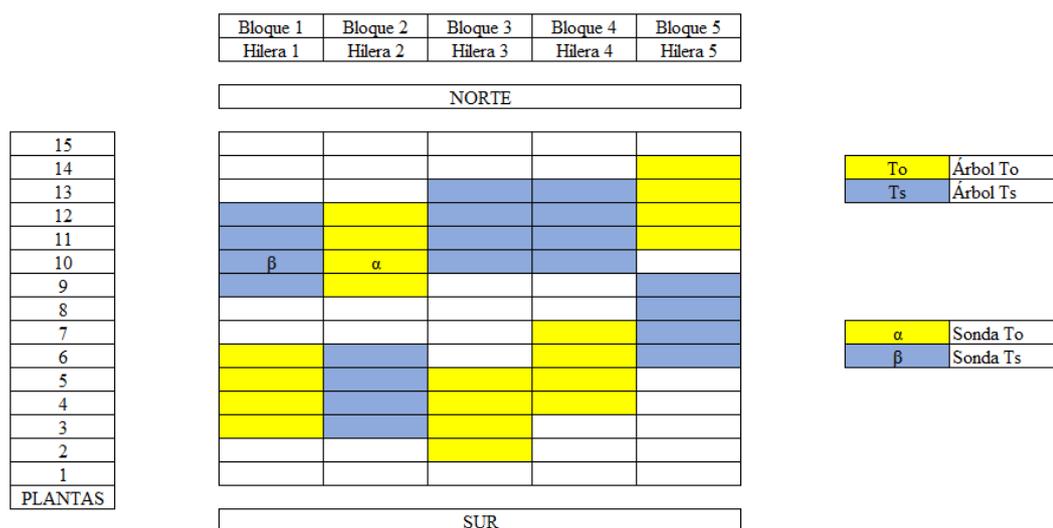


Figura 2. Esquema del diseño experimental en chirimoyos “Concha Lisa”, La Serena.

## Manejo del experimento

Se instaló un sistema de fertirrigación independiente para el manejo del tratamiento Ts, sonda de capacitancia. Adicionalmente, en ambos tratamientos se realizó el aforamiento del sistema de riego y se instaló una sonda de capacitancia FDR (Enviroscan<sup>MR</sup>, Sentek) a 30 cm del tronco de una planta representativa del huerto. Cada sonda contó con 5 sensores ubicados a 10; 20; 30; 50 y 80 cm de profundidad en el perfil del suelo. La información del contenido de agua en el suelo evaluado por las sondas de capacitancia fue almacenada cada 15 minutos por una unidad de telemetría remota conectada a las sondas, transmitiendo la información a un servidor para su almacenamiento y procesamiento, con lo que se determinaron las Líneas de Gestión (LG) (Cuadro 2). El sistema que se utilizó para analizar los datos fueron la plataforma DropControl<sup>MR</sup> e IRRIMAX Live<sup>MR</sup>.

Ya instaladas las sondas de capacitancia, hubo un periodo de estabilización de la variabilidad de las lecturas, donde se evaluó el comportamiento de los sensores y el sistema en sí, corroborando que existió un buen funcionamiento, continuidad en las lecturas y no existía presencia de anomalías.

El equipo TDR 150 (Spectrum Technologies) que permite evaluar el contenido de agua en forma discontinua, se utilizó con frecuencia variable a través de la temporada, con el fin de evaluar el comportamiento del bulbo de mojado generado con el riego, en específico el ancho de éste en la sobrehilera, para ambos tratamientos.

Se utilizó una estación meteorológica Davis Vantage (Davis Instruments, California, EE. UU.) instalada en el sector, de la cual se obtuvo los valores de temperatura y evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

Se utilizaron imágenes satelitales obtenidas del sensor MSI del satélite Sentinel 2, para la estimación de índices de vegetación, el cual tiene un píxel de 10 x 10 m.

Cuadro 2. Líneas de Gestión de riego usando sondas de capacitancia (Callejas *et al.*, 2014).

Línea de Gestión	Descripción
Nivel de lleno (NLL)	Es la capacidad máxima de agua que puede contener el suelo, sin producir percolación profunda. A este nivel de aporte de agua en el suelo, el sensor ubicado a mayor profundidad en la sonda no debe mostrar actividad o esta ser mínima.
Capacidad de campo sonda (CCs)	Es el contenido de agua en el suelo, luego de un evento de lluvia o riego en abundancia y ser dejado drenar libremente durante 24 a 48 horas.
Punto de recarga (PR)	Es el punto donde la caída de agua diaria del contenido de agua en el suelo, medida por los sensores superiores a una demanda atmosférica máxima y constante, comienza a disminuir debido a la disminución de contenido de agua en el suelo y la dificultad que genera en las raíces para absorberla (Umbral de riego).

## Evaluaciones

### Evaluaciones generales

**Descripción del suelo.** Se realizó una calicata en el huerto de 1 m de profundidad y 2 m de ancho, tomándose una muestra de suelo de los primeros 40 cm, zona de mayor presencia y actividad radical, para realizar un análisis textural.

**Descripción de la ubicación de las raíces.** Mediante calicatas se procedió a identificar la zona de suelo explorada por las raíces de los árboles.

**Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>), temperatura media y días grado (°DG).** Se obtuvieron los datos desde una estación meteorológica Davis Vantage (Davis Instruments, California, EE. UU.) instalada en el predio. Obtenidos los datos de temperatura media, se calcularon los °DG desde la fecha de deshoje y desde polinización para el chirimoyo, considerando una temperatura umbral igual a 11°C (CIREN, 1989).

### Evaluaciones de riego

**Evaluación del contenido de agua en el suelo usando sondas de capacitancia FDR.** Se monitorizó el contenido de agua en el suelo cada 15 minutos durante toda la temporada mediante las sondas de capacitancia FDR (Enviroscan<sup>MR</sup>, Sentek, Stepney, Australia) instaladas en cada tratamiento y la plataforma Dropcontrol<sup>MR</sup>, con la cual se definió el tiempo y la frecuencia de riego. Esta información permitió generar el balance hídrico posterior.

**Evaluación del contenido de agua en el suelo usando equipo TDR 150.** Se evaluó desde la superficie (vástagos de 20 cm) el comportamiento del bulbo de mojamiento hacia la lateral (entre hilera).

**Balance hídrico.** Se cuantificaron las entradas y salidas del sistema para obtener el valor de consumo diario de las plantas (ET<sub>c</sub>), mediante la ecuación 1 (adaptado de Hillel, 1998):

$$ET_c = R + P_{ef} + A_c - E_s - P_{prof} - \Delta S \quad (1)$$

Donde:

ET<sub>c</sub> = Evapotranspiración de cultivo (mm)

R = Cuota de riego (mm)

P<sub>ef</sub> = Precipitación efectiva (mm)

A<sub>c</sub> = Ascenso capilar (mm)

E<sub>s</sub> = Escorrentía superficial (mm)

P<sub>prof</sub> = Percolación profunda (mm)

ΔS = Cambio en el contenido de agua volumétrico en el suelo en la zona de raíces (mm)

La escorrentía superficial se consideró como 0, ya que el huerto no presentaba una pendiente prominente, al igual que el ascenso capilar que fue considerado insignificante en la ecuación.

La percolación fue calculada como el contenido de agua por sobre el NLL evaluado a través del gráfico sumado y el último sensor del apilado, en el software IRRIMAX Live.

**Total agua de riego utilizada.** Mediante el producto entre las horas de riego realizadas, las que fueron validadas por el registro de las sondas, y la descarga del sistema de riego, se obtuvo el total de agua de riego aplicada en la temporada ( $\text{mm ha}^{-1}$ ).

**Coefficiente de cultivo práctico (Kcs).** Se utilizaron 2 supuestos

1. El contenido de agua en el suelo fue adecuado y no limitante para la planta.
2. Fuera de los periodos de riego,  $ET_c = \Delta S$ ; debido a que la variación diaria de contenido de agua en el suelo fue dada únicamente por la evapotranspiración, no habiendo percolación ni aportes hídricos siendo estos valores 0.

Para que esto se cumpla se procedió a neutralizar la ecuación 1, quedando en ecuación 2:

$$ET_c = \Delta S \quad (2)$$

Finalmente, el Kcs se calculó a partir del  $ET_c$  obtenido por la ecuación 2 y su relación con la  $ET_o$  de la estación meteorológica, a través de la fórmula:

$$Kcs = \frac{ET_c \text{ (mm día}^{-1}\text{)}}{ET_o \text{ (mm día}^{-1}\text{)}}$$

### Evaluaciones a nivel de planta

#### Patrón de consumo diario y por profundidad de agua de riego

Se analizaron los datos obtenidos por las sondas de capacitancia, utilizando 8 repeticiones a través de la temporada 2020, considerando días con alta  $ET_o$  y evidente actividad de raíces.

- a) **Patrón del consumo diario normalizado.** Se determinaron los cambios horarios utilizando el gráfico sumado a través del software IRRIMAX Live, establecidos como el cambio horario negativo de los contenidos de agua del suelo. Estos fueron normalizados para cada día evaluado con el objetivo de definir el comportamiento de consumo de las raíces. Se normalizó mediante la fórmula:

$$z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

- b) **Patrón de consumo por profundidad normalizado.** Se analizó por separado el comportamiento de los sensores con el gráfico apilado, mediante el software IRRIMAX Live. Se calculó el déficit diario total de cada uno y se normalizaron los valores para cada día a través de la misma fórmula utilizada en el punto a).

**Número de flores polinizadas, número de frutos y rendimiento por árbol.** Se definió el número de frutos por árbol mediante la polinización manual y el conteo de fruta cuajada.

La polinización comenzó con la recolección de flores en la tarde, momento en que la parte masculina de la flor libera el polen, se pesaron las flores, se les removieron los pétalos y se volvieron a pesar. Luego se dejaron secando durante la noche sobre una mesa y bajo una malla anti-áfidos. Pasado un día se tamizó la flor para que cayera el polen y anteras, se recolectaron, se pesaron y se realizó una mezcla con lycopodium en una relación 2:1. Esta mezcla se agregó a una bomba insufladora y se aplicó ésta a las flores durante la mañana, momento en que la parte femenina de la flor es receptiva. Se procuró realizar una bombeada por flor y se marcó como polinizada al romperle uno de sus tres pétalos.

**Área de sección transversal del tronco (ASTT).** Se estimó a partir del perímetro del tronco medido a 40 cm del suelo con una cinta de medir, a inicio y fin de temporada. Con el valor obtenido se calculó el área transversal del tronco (ASTT) mediante la fórmula:

$$\text{Área de sección transversal de tronco (cm}^2\text{)} = \frac{(\text{Perímetro (cm)})^2}{12,56}$$

**Peso y categoría de frutos.** En la cosecha, se pesaron los frutos utilizando una balanza de precisión y se utilizaron los parámetros de calidad según tamaño comercial definidos por la empresa, que correspondió a frutos entre 0 – 300, 301 – 350, 351 – 380, 381 – 420, 421 – 450 y > 450 g.

**Peso poda.** Posterior a la labor de poda realizada en el huerto, a final de temporada (postcosecha), se procedió a coleccionar todo el material vegetativo podado para pesarlo en una balanza de precisión y obtener el valor de peso poda por árbol medido en kg.

**Unidades SPAD.** Con el objetivo de constatar un buen desarrollo de los árboles, se midió con el instrumento SPAD 502 Plus (Konica Minolta, Osaka, Japón) en cosecha, este procedimiento se realizó en 3 hojas por el lado oriente y 3 hojas por el lado poniente del árbol, elegidas según edad.

**Caracterización de la cobertura vegetal.** Se procedió a realizar lo siguiente:

- a) **Radiación fotosintéticamente activa interceptada (PARI).** Se midió la radiación fotosintéticamente activa interceptada por las plantas mediante un ceptómetro Accupar LP80 (Decagon Devices, Washington, EE. UU.), calculada por el diferencial entre la radiación fotosintéticamente activa incidente ( $PAR_0$ ) y la radiación fotosintéticamente activa no interceptada ( $PAR_{ni}$ ) medida bajo el follaje del árbol (Hochmaier, 2010). La medición se realizó 3 veces en el día: al medio día solar (MDS), 4 y 2 horas antes de éste, en un día despejado. Cada medición se realizó mediante el trazado de 7 transectos perpendiculares a la hilera de tratamiento, en cada transecto se hicieron 6 mediciones de 80 cm cada una, de tal forma de que las evaluaciones cubrieran toda la superficie asignada al árbol. Se realizó una vez en la temporada en julio de 2019.
- b) **Área y peso foliar.** Se midió el peso, largo, ancho y área foliar individual de un total de 15 hojas, con el medidor de área foliar LI-COR®, modelo LI-300 (LI-COR Biosciences, Nebraska, EE. UU.) para determinar una relación entre las variables. Luego se utilizó una muestra de 200 hojas de un árbol para estimar el peso y área foliar de estas, las cuales fueron almacenadas en bolsas de papel y

llevadas al laboratorio de Viticultura de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile en donde se realizaron las mediciones. Se realizó la toma de muestras una vez terminada la cosecha.

- c) **Seguimiento vegetativo con imágenes satelitales.** Mediante el procesamiento de las imágenes satelitales, se procedió a evaluar el índice NDVI por meses de las temporadas. Los valores se obtuvieron a partir de la reflectividad del espectro de luz rojo visible (R) e infrarrojo cercano (NIR) de las bandas espectrales del satélite, mediante la fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$$

La evolución de los valores de NDVI por mes se realizaron para el sector del ensayo completo, debido a que el tamaño del píxel no cuadró con la disposición de las repeticiones de cada tratamiento. Se consideraron 6 píxeles para obtener el promedio por evaluación.

**Relación entre valor NDVI y peso fresco total de las hojas del árbol.** Se evaluó el peso fresco total de las hojas de 5 árboles en octubre de 2020, de diferente valor NDVI a través de la temporada, para poder predecir el peso total en función de los valores NDVI.

**Relación entre peso fresco de las hojas del árbol y área foliar.** Se evaluó la relación entre los resultados obtenidos en el punto b) mediante regresiones.

**Relación entre NDVI y área foliar.** Las dos relaciones anteriores se unificaron, para así obtener el valor de área foliar en función del valor NDVI.

**Relación entre NDVI y Kcs.** Se relacionaron los resultados de ambas variables obtenidas, a fin de buscar una forma de predecir el Kcs mediante valores NDVI.

### **Generación de índices de eficiencia**

**Eficiencia del uso de agua de riego (EUAr).** La eficiencia del uso del agua (EUA) se define como la relación de biomasa acumulada, según las relaciones: asimilación de CO<sub>2</sub> (A), biomasa total (B), o rendimiento (G) y el agua consumida, expresada como transpiración (T), evapotranspiración (ET), o el total de agua aplicada al sistema (I). La escala de tiempo para definir la EUA puede ser instantánea (i), diaria (d), o estacional (s) (Sinclair *et al.*, 1984). En este caso, los cálculos de EUA se realizaron de acuerdo con las mediciones de rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y el total de agua aplicada al sistema (mm ha<sup>-1</sup>), por medio de la fórmula:

$$\text{EUAr (kg mm}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Total agua riego temporada (mm ha}^{-1}\text{)}}$$

**Eficiencia productiva:** Con el número de frutos por árbol definido a cosecha, se obtuvo la carga frutal por cm<sup>2</sup> de ASTT, mientras que la eficiencia se calculó mediante los kg de fruta cm<sup>-2</sup> de ASTT.

### **Análisis estadístico**

Para evaluar las diferencias entre tratamientos se realizó un análisis bajo modelos lineales mixtos y en los casos en donde se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos se realizó una prueba de comparación múltiple de Fisher, con un  $\alpha= 0,05$ .

Se realizó una regresión entre las variables de días post brotación y Kcs, °DG y Kcs, peso fresco de hojas y área foliar, NDVI y peso fresco de hojas, NDVI y área foliar, NDVI y Kcs.

Todos los análisis se efectuaron utilizando el software estadístico Infostat versión Estudiantil.

## RESULTADOS

### Evaluaciones generales

#### Descripción del suelo

El perfil del suelo en los primeros 50 cm presenta textura franco arenoso (USDA), con las propiedades señaladas en el Cuadro 3. Se observa un valor de pH ligeramente alcalino y de conductividad eléctrica (CE) no salina, los cuales no son limitantes para la especie cultivada. El contenido de materia orgánica en el suelo se interpreta como un valor bajo, al igual que el porcentaje de pedregosidad.

Cuadro 3. Propiedades del suelo.

pH	Conductividad eléctrica	Materia orgánica en el suelo	Pedregosidad
	dS m <sup>-1</sup>	%	%
7,5 *	0,85 **	0,97	3,7 ***

\* pH óptimo entre 6,0 y 7,5 (CIREN, 1989)

\*\* CE tolerada hasta 2,5 dS m<sup>-1</sup> (CIREN, 1989)

\*\*\* <35% sin limitación (CIREN, 1989)

Según Luzio (2010), la serie de suelo corresponde a las Palmeras de Coquimbo, suelos con alto grado de evolución, que tienen un perfil A-B-C y una profundidad de 60 a 90 cm sobre un sustrato de arenas y gravas que ocupan el 80% en volumen. El horizonte superficial posee una clase textural que puede variar entre franco arcillo limosa y franco arcillo arenosa, con estructura de bloques subangulares bien desarrollados. En el horizonte B, generalmente se incrementa la fracción fina, al mismo tiempo que disminuye la cantidad de raíces finas. La CE siempre es más elevada en los horizontes superficiales y disminuye en profundidad, desde 1,4 a 0,6 dS m<sup>-1</sup>. A la mayoría de las fases reconocidas se les han asignado Clases de Capacidad de Uso entre II y III.

#### Descripción de la ubicación de las raíces

Usando calicatas, se observó que el sistema radical de los árboles se ubica principalmente en los primeros 40 a 50 cm del perfil del suelo, con alta presencia de raíces finas y medias (Figura 3) que disminuyen en profundidad, zona donde se ubican las raíces gruesas. Lateralmente, tienden a concentrarse en el bulbo de mojamiento.



Figura 3. Perfil del suelo en chirimoyos “Concha Lisa” para observación de raíces.

### Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>), temperatura media y días grado (°DG)

La información se presenta entre el mes de diciembre y noviembre del siguiente año, correspondiendo al inicio y término de la temporada de crecimiento para el chirimoyo (Figura 4). La ET<sub>0</sub> en ambas temporadas comienza con valores estables en torno a los 3 mm día<sup>-1</sup> y en aumento hasta el final del verano al igual que la temperatura. Luego se observa una disminución a medida que se entra en otoño y son menores en invierno, en torno a 1,5 mm día<sup>-1</sup> en promedio. Conforme avanza el año los valores aumentan en primavera hasta el término de temporada.

El sector cuenta con una ET<sub>0</sub> media anual de 2,45 mm día<sup>-1</sup> y una temperatura media de 14,4°C. La acumulación de °DG para la temporada 2019 y 2020 es equivalente a 1.149,8 y 1.216,4, respectivamente; y considerando desde el día de polinización hasta final de octubre alcanza una suma de 820,3 y 906,4 °DG, para las mismas temporadas.

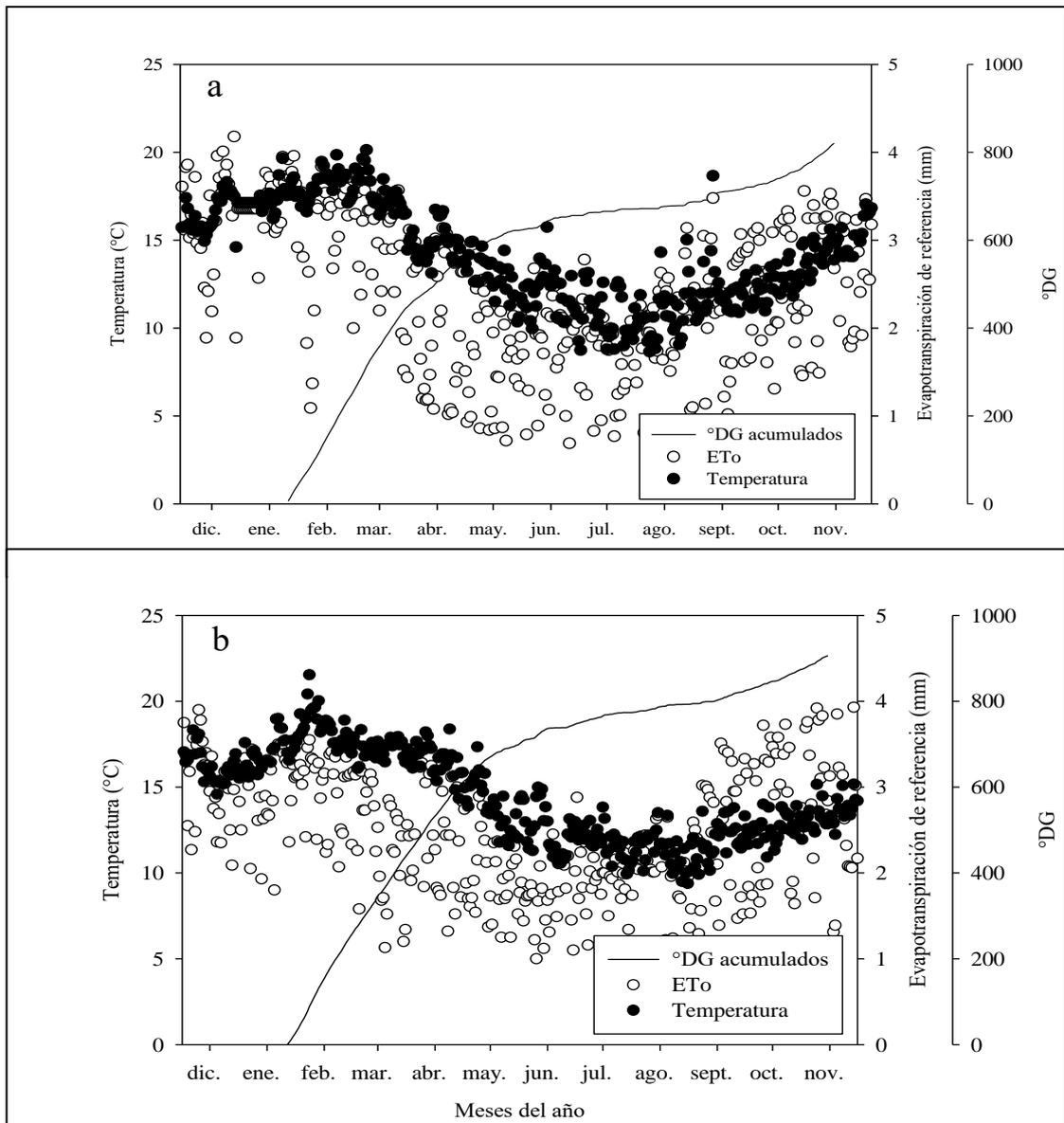


Figura 4. ET<sub>0</sub>, temperatura media y °DG acumulados desde polinización durante la temporada 2019 (a) y durante la temporada 2020 (b).

En los cuadros 4 y 5 se presentan los estados fenológicos asociados a los días post brotación (DPB) y ETo acumulada semanalmente para cada temporada. En la primera temporada la acumulación semanal de la ETo comienza a disminuir marcadamente desde el 105 DPB (Cuadro 4) iniciado el otoño, este periodo marca la mayor parte del crecimiento del fruto.

Cuadro 4. ETo acumulada por semana desde deshoje y poda hasta fin de temporada 2019.

Estado fenológico	Días post brotación	ETo acumulada por semana	Estado fenológico	Días post brotación	ETo acumulada por semana
	Nº	mm		Nº	mm
Deshoje y poda	-14	23,93		182	11,75
	-7	18,92		189	13,39
Inicio de brotación	7	22,73		196	11,44
	14	26,28		203	14,06
	21	22,05		210	12,61
	28	22,84		217	12,52
Floración	35	24,46		224	8,29
	42	24,42		231	12,68
	49	25,48		238	13,04
Desarrollo de fruto	56	16,67		245	14,82
	63	23,53		252	14,09
	70	22,34		259	15,89
	77	24,64		266	15,60
	84	20,71		273	16,83
	91	22,63		280	12,14
	98	20,81		287	18,02
	105	18,84		294	16,56
	112	17,78		301	17,44
	119	10,07	Madurez de cosecha	308	16,05
	126	15,90		315	20,03
	133	13,20		322	16,35
	140	12,45		329	17,38
	147	12,46	Postcosecha	336	22,73
154	11,56		343	20,12	
161	10,38		350	15,98	
168	12,05	Deshoje y poda	357	4,53	
175	12,89				

Para la segunda temporada, la acumulación semanal de la ETo sigue un patrón similar, disminuyendo ésta desde el 98 DPB (Cuadro 5) durante otoño e invierno.

Cuadro 5. ETo acumulada por semana desde deshoje y poda hasta fin de temporada 2020.

Estado fenológico	Días post brotación	ETo acumulada por semana	Estado fenológico	Días post brotación	ETo acumulada por semana
	N°	mm		N°	mm
Deshoje y poda	-14	17,54		168	13,08
	-7	24,07		175	12,09
Inicio de brotación	7	19,47		182	10,36
	14	20,01		189	12,71
	21	21,35		196	14,33
	28	19,65		203	14,13
	35	18,73		210	12,58
Floración	42	23,85		217	12,48
	49	21,10		224	13,96
	56	22,31		231	12,66
Crecimiento de fruto	63	20,24		238	15,94
	70	20,62		245	15,75
	77	20,05		252	13,71
	84	18,80		259	13,61
	91	19,80		266	13,28
	98	13,63		273	19,24
	105	15,40		280	17,56
	112	16,25		287	19,01
	119	20,14	Madurez de cosecha	294	14,84
	126	16,27		301	18,96
	133	15,26		308	22,09
Postcosecha	140	16,24		315	21,07
	147	14,35		322	16,72
	154	14,13		329	21,42
	161	12,81	Deshoje y poda	336	13,94

La acumulación de °DG y DPB asociados con el avance de los estados fenológicos se aprecia en la Figura 5. La mayor acumulación ocurrió durante la etapa de crecimiento de fruto que comenzó a inicio de verano y terminó a inicios de primavera, momento en que existió una menor tasa diaria de acumulación de °DG (Figura 4).

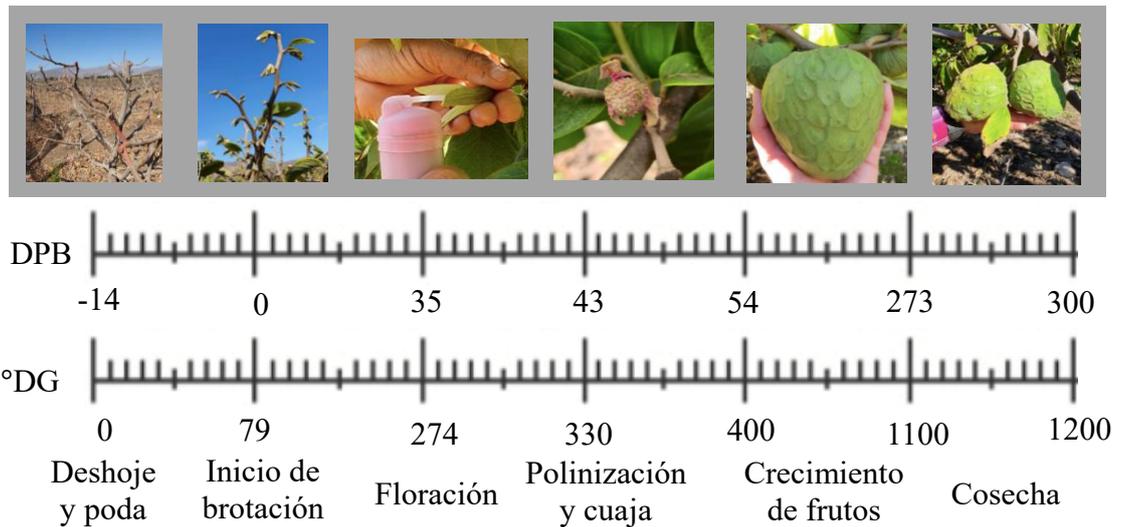


Figura 5. Estimación de la duración y acumulación de °DG de los estados fenológicos para todo el periodo (media de ambas temporadas).

### Evaluaciones de riego

#### Evaluación del contenido de agua en el suelo usando sondas de capacitancia FDR

La monitorización del riego mediante las sondas de capacitancia comenzó el día 22 de febrero del año 2019, una vez finalizada la labor de polinización manual. Para cada una de ellas, se propusieron sus Líneas de Gestión Nivel de Lleno (NLL) y Punto de Recarga (PR), que se fueron ratificando en el desarrollo del estudio. La sonda del To fue utilizada como unidad de registro de la labor del riego del campo, definida por la ETo-Kc y la sonda del Ts, que requirió mayor atención, dado que cumplía un rol fundamental en la definición del riego de este tratamiento. En la Figura 6, se presenta el comportamiento de los ciclos de riego para el Ts y el To a modo de ejemplo, en los meses de julio y agosto de 2020.

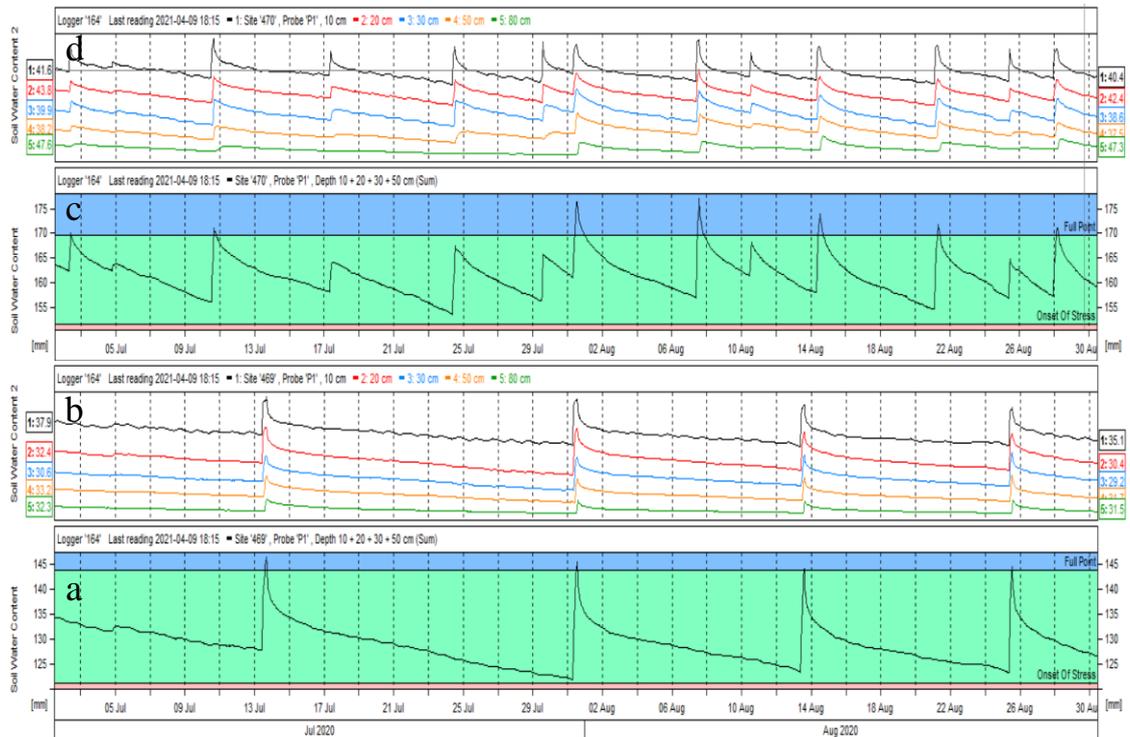


Figura 6. Ciclos de riego definido por sonda de capacitancia en Ts según sus Líneas de Gestión (a y b) y en To por la ETo-Kc (c y d), en IRRIMAX Live. (a) Ts, gráfico sumado para la determinación de la frecuencia de riego, (b) Ts, gráfico apilado con la actividad de cada sensor y profundidad, para la determinación del tiempo de riego. (c) To, gráfico sumado para registro de riego, (d) To, gráfico apilado con la actividad de cada sensor.

Mediante los gráficos apilados se observa el movimiento de agua en profundidad a través de los diferentes sensores para cada riego (figuras 7 y 8). Se logró identificar los momentos, en que producto de un excesivo aporte hídrico debido a una incorrecta determinación del tiempo de riego o una gran precipitación, se detectó actividad en el sensor ubicado a mayor profundidad, pasando de la zona activa de raíces. Además, se observa que To y en ambas temporadas mantuvo un mayor contenido de agua en las diferentes profundidades como reflejo de la mayor frecuencia de riego implementada.

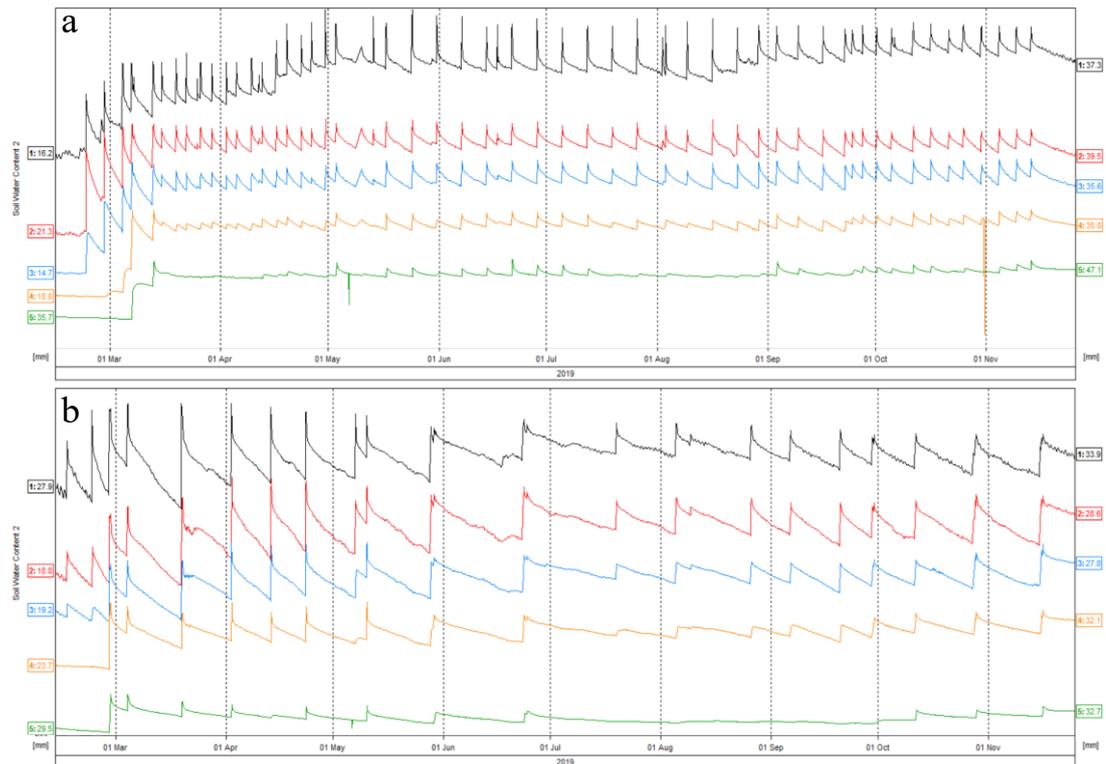


Figura 7. Gráfico apilado del contenido de agua en el suelo para cada sensor durante la temporada 2019, en los tratamientos To (a) y Ts (b).

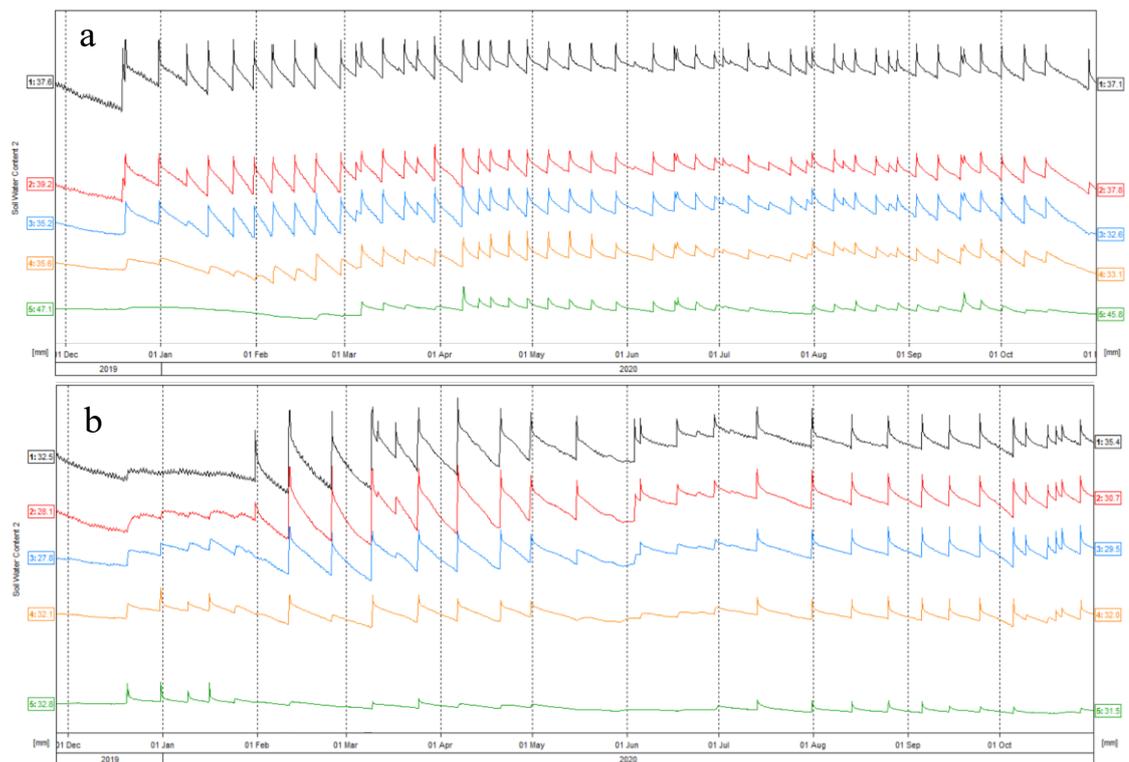


Figura 8. Gráfico apilado del contenido de agua en el suelo para cada sensor durante la temporada 2020, en los tratamientos (a) To y Ts (b).

Finalmente y mediante el análisis en detalle de uno de los ciclos de riego correspondiente al 31 de julio de 2020 en Ts (Figura 9), se pudo cuantificar el tiempo requerido para que

el frente de mojamiento llegara hasta los 80 cm. El riego comenzó las 8:00 am y fue detectado por el sensor de los 10 cm, posteriormente a las 8:18 am (+18 min) a los 20 cm; a las 9:21 am (+63 min) a los 30 cm; a las 10:34 am (+73 min) a los 50 y a las 13:04 pm (+150 min) a los 80 cm. En total se requirieron 304 minutos.

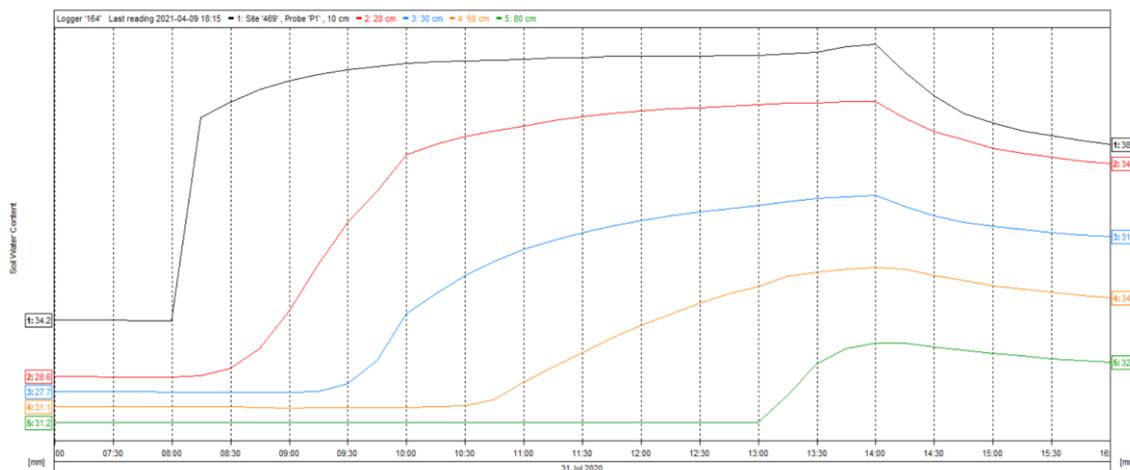


Figura 9. Gráfico apilado para la determinación del tiempo de riego en Ts, el 31 de julio de 2020.

### Evaluación del contenido de agua en el suelo equipo TDR 150

Usando el equipo TDR150 (Figura 10) se monitorizó la conformación superficial que presentó el bulbo de mojamiento. Se puede señalar que los ciclos de riego con la frecuencia y tiempo de cada tratamiento no afectaron el comportamiento superficial del bulbo, presentándose muy similar para cada tratamiento y temporada de evaluación.

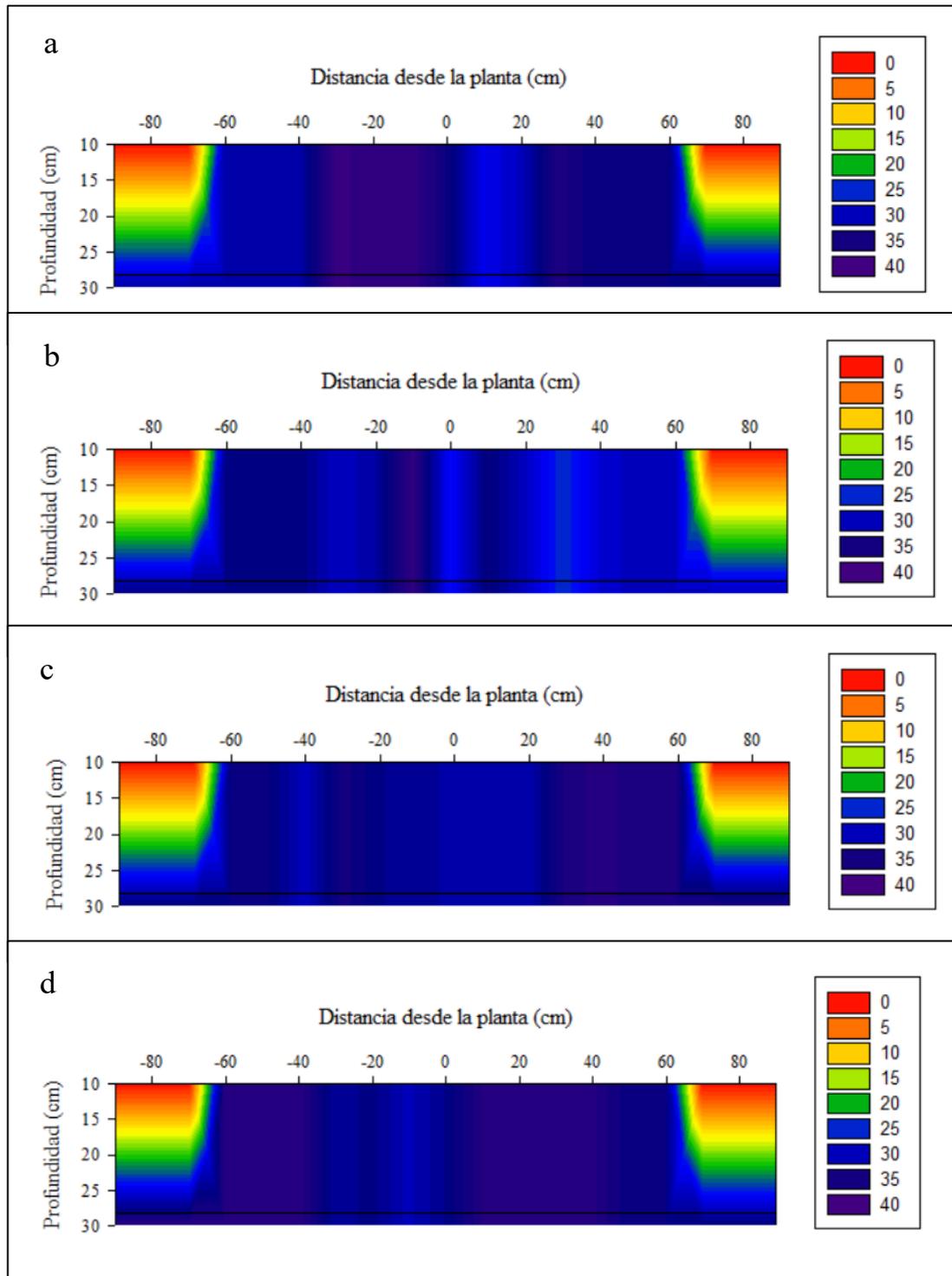


Figura 10. Contenido volumétrico (%) de agua en el suelo, evaluado con TDR150 desde la superficie (vástago de 20 cm) en agosto 2019; To (a) y Ts (b), así como en marzo de 2020; To (c) y Ts (d). En el recuadro derecho se indica una escala de referencia (%) para cada gráfico.

### **Balance hídrico**

La cuantificación de las entradas y salidas de agua en el sistema, para cada temporada, se grafican en las figuras 11 y 12. En la temporada 2019, los riegos se realizaron durante todo el periodo en ambos tratamientos, siendo menos frecuentes en Ts, principalmente en invierno.

Se presentaron bajas precipitaciones, con tan solo 10,79 mm entre el final de mayo y mediados de junio. Estos volúmenes no sobrepasaron los 80 cm de profundidad ni el NLL en los tratamientos, considerándose todo el monto como precipitación efectiva.

Los montos de percolación fueron mayores en To, alcanzando 183,4 mm, mientras que en Ts se registraron 90,8 mm percolados, distribuidos a lo largo de la temporada (Figura 11).

Para el cambio en el contenido de agua volumétrico en el suelo en la zona de raíces ( $\Delta S$ ) se observó un alto valor en los días de riego, producto del cambio en el contenido de agua en el día debido al aporte hídrico. Luego en los periodos entre riego disminuyó y varió dependiendo del consumo diario de las plantas.

Durante la temporada 2020, el comportamiento del riego fue similar a la primera temporada, con To manteniendo una alta frecuencia en el periodo de invierno.

Las precipitaciones fueron mayores al 2019, precipitando un total de 52 mm desde inicio de junio hasta la primera semana de julio. Para dos de estos eventos, se observó percolación profunda en To, al sobrepasar el NLL y detectarse un incremento en el contenido de agua en el sensor a mayor profundidad. Esto no sucedió en Ts, para el cual todo el volumen precipitado fue considerado precipitación efectiva.

Los montos percolados en los tratamientos fueron para To de 167 mm y para Ts, disminuyó alcanzando solo 28,7 mm (Figura 12).

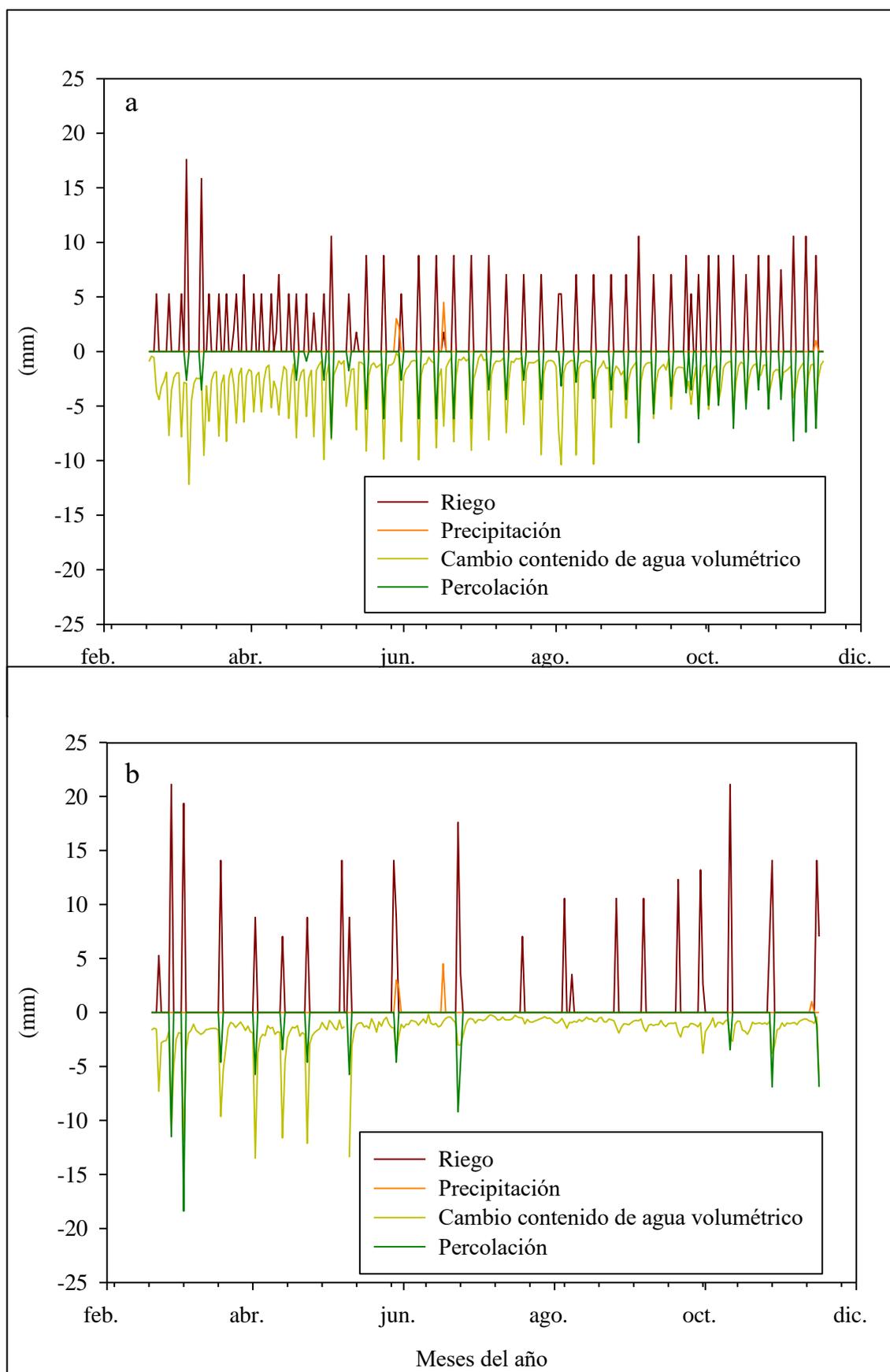


Figura 11. Curso temporal del riego, la precipitación, el cambio del contenido de agua volumétrico y la percolación en To (a) y en Ts (b), durante la temporada 2019.

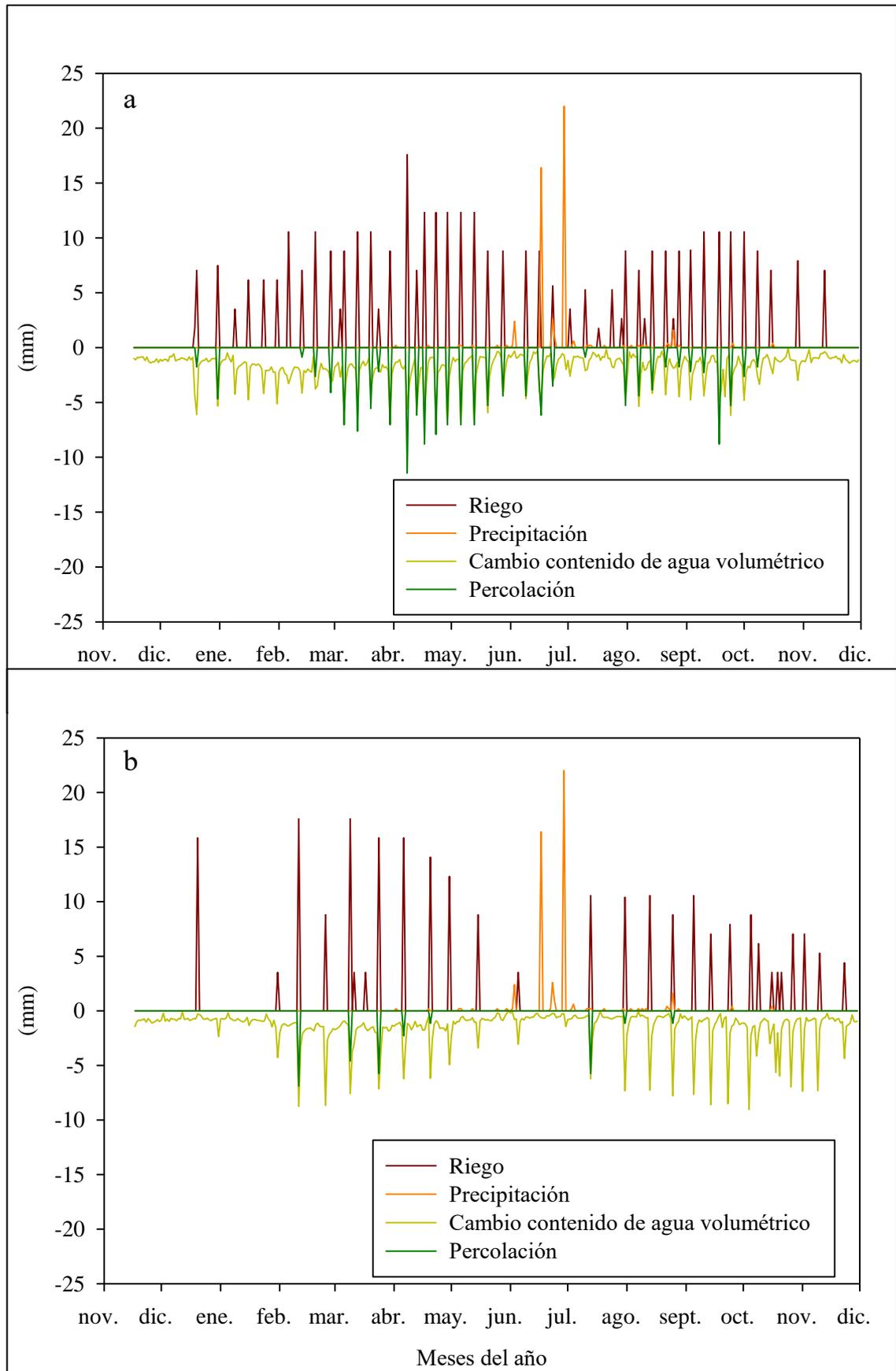


Figura 12. Curso temporal del riego, la precipitación, el cambio del contenido de agua volumétrico y la percolación en To (a) y en Ts (b) durante la temporada 2020.

### Total agua de riego utilizada

La cantidad de agua de riego aplicada en Ts fue entre un 65 y 71% de lo aplicado en To en las diferentes temporadas, respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Riego en ambos tratamientos durante las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	Riego temporada mm ha <sup>-1</sup>
2019	
To	591,6
Ts	425,5
2020	
To	516,9
Ts	334,6

Se consideraron los montos de riego aplicados desde mediados de noviembre del año 2018 (momento de deshoje y poda) para la primera temporada, y finalizaron durante el mes de noviembre de 2019, fecha en que comienza a contabilizarse el agua de riego para la segunda temporada y finalizando en noviembre de 2020 (Figura 13).

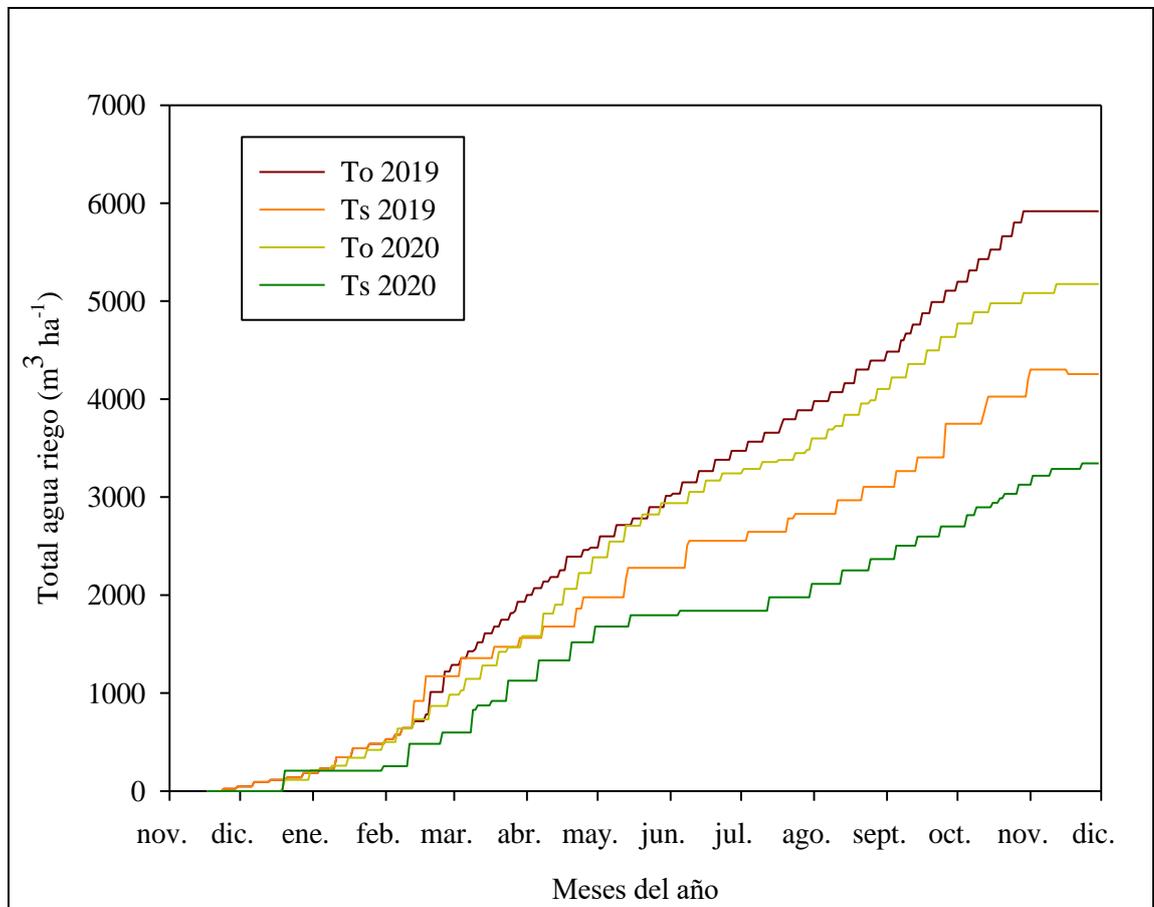


Figura 13. Comparación de agua de riego acumulada en ambos tratamientos durante las temporadas 2019 y 2020.

En la Figura 14 se presentan los volúmenes de agua de riego para cada tratamiento y temporada, las ETo acumuladas y a modo de referencia, la ETc calculada según los Kc propuestos para el chirimoyo en España por Durán-Zuazo *et al.* (2019). Claramente se observa que el riego, usando sondas de capacitancia, permitió una mayor optimización del recurso hídrico, respecto del método ETo-Kc (To).

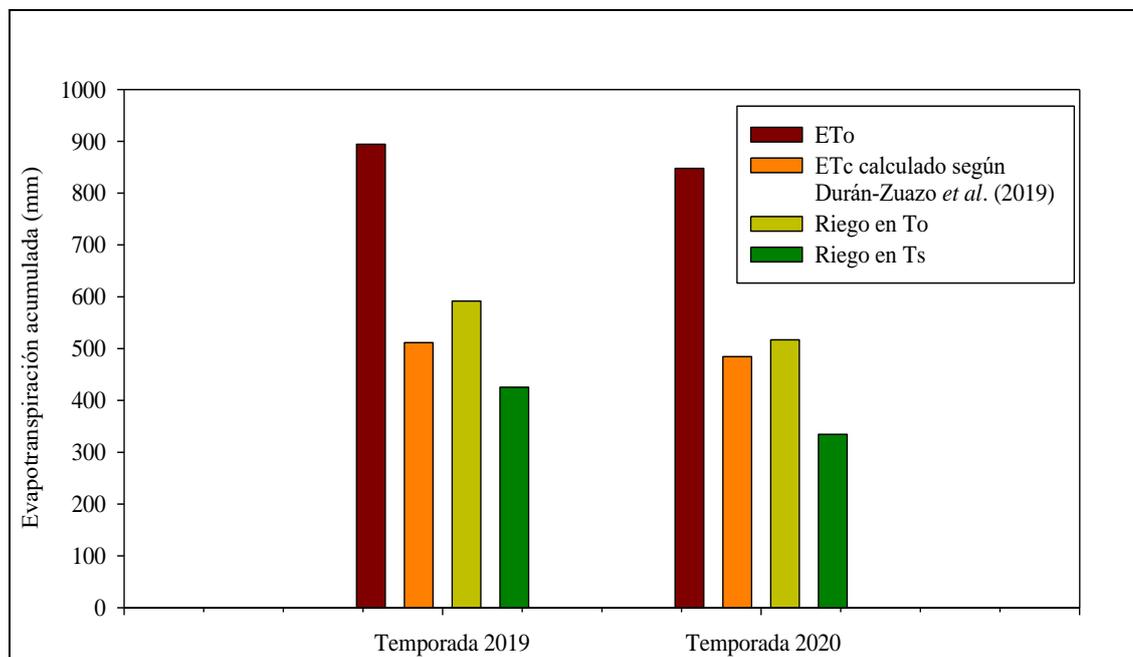


Figura 14. Acumulación de ETo, ETc (Durán-Zuazo *et al.*, 2019), riego en To y Ts, en cada temporada.

### Coefficiente de cultivo práctico (Kcs)

Utilizando la información generada con el Ts, se procedió a calcular el Kcs que se presenta en la Figura 15a. En ella se pueden observar 3 etapas: en una primera etapa se constata un rápido desarrollo del follaje lo que es ratificado en la Figura 21 y una ETo de valores medios y constantes ( $3 \text{ mm día}^{-1}$ , Figura 4). En la segunda etapa, el follaje se expresó al máximo y se mantuvo constante, correspondiendo a la mayor parte del período de crecimiento del fruto. La demanda atmosférica bajó drásticamente debido a las condiciones que se presentaron en otoño e invierno en la zona, con una ETo promedio de  $1,5 \text{ mm día}^{-1}$ . Para la tercera etapa, el follaje comenzó a disminuir y la demanda atmosférica fue aumentando paulatinamente ya entrando en la primavera, procediendo a la cosecha de los frutos.

Para la temporada 2019, el rango de valores promedio - percentil 70 para las etapas de floración, cuaja y crecimiento de fruto evaluadas fueron: 0,63-0,75; 0,67-0,79 y 0,59-0,66. Para la temporada 2020, los rangos de valor promedio - percentil 70 para las etapas antes mencionadas fueron: 0,43-0,47; 0,66-0,73 y 0,43.

Otra forma de ver la información es la Figura 15b, donde los diferentes Kcs se presentan en función de los  $^{\circ}\text{DG}$ . Desde polinización en adelante, junto a una alta tasa de acumulación de  $^{\circ}\text{DG}$ , los valores de Kcs fueron incrementando hasta un máximo con 460  $^{\circ}\text{DG}$ . Posteriormente los valores disminuyen al igual que la acumulación de  $^{\circ}\text{DG}$  en el periodo de otoño hasta el final de la temporada.

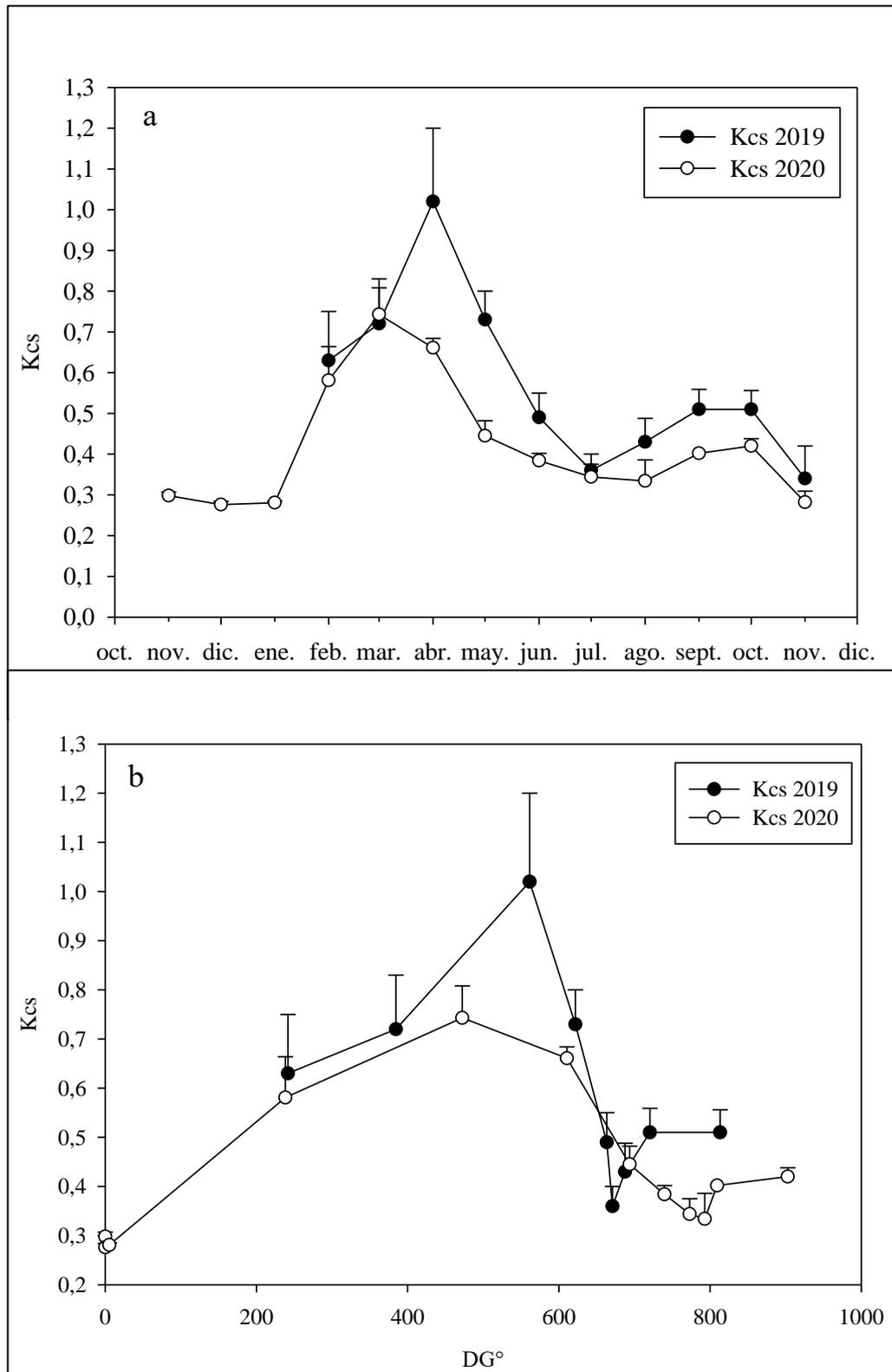


Figura 15. Kcs promedio - percentil 70 por mes (a) y por °DG acumulados desde polinización (b) para ambas temporadas, determinado con información obtenida en Ts. Barras verticales corresponden a percentil 70.

Los valores de Kcs variaron entre temporadas durante el ensayo, siendo mayores en la primera temporada. Probablemente debido a que hubo más inconvenientes en lograr implementar correctamente el manejo de riego, a diferencia de la segunda temporada en que se contaba con la experiencia previa, por lo que, para efectos prácticos serán estos últimos los que son considerados como resultados a discutir.

En el Cuadro 7, se presentan dos funciones para determinar el Kcs mediante otras variables, utilizando ecuaciones de tercer grado. La función A, mediante los días post brotación y la función B, utilizando los °DG como predictor.

Cuadro 7. Funciones para determinar el Kcs a partir de los °DG o los DPB, con información obtenida de la temporada 2020.

Función	Parámetro		Ecuación	R <sup>2</sup>
	Dependiente	Independiente		
A	Kcs	DPB	$y = 9E-08 x^3 - 5E-05 x^2 + 0,0082 x + 0,2303$	0,60
B	Kcs	°DG	$y = 3E-09 x^3 - 6E-06 x^2 + 0,0032 x + 0,2379$	0,77

Finalmente, el Kcs estimado para la temporada 2020 en perspectiva con los Kc propuestos por otros autores para la especie, se muestra en la Figura 16. Para los Kc de Rodríguez *et al.* (2011) y Duran-Zuazo *et al.* (2019), se graficaron las medias para las etapas de floración, cuaja y crecimiento de fruto.

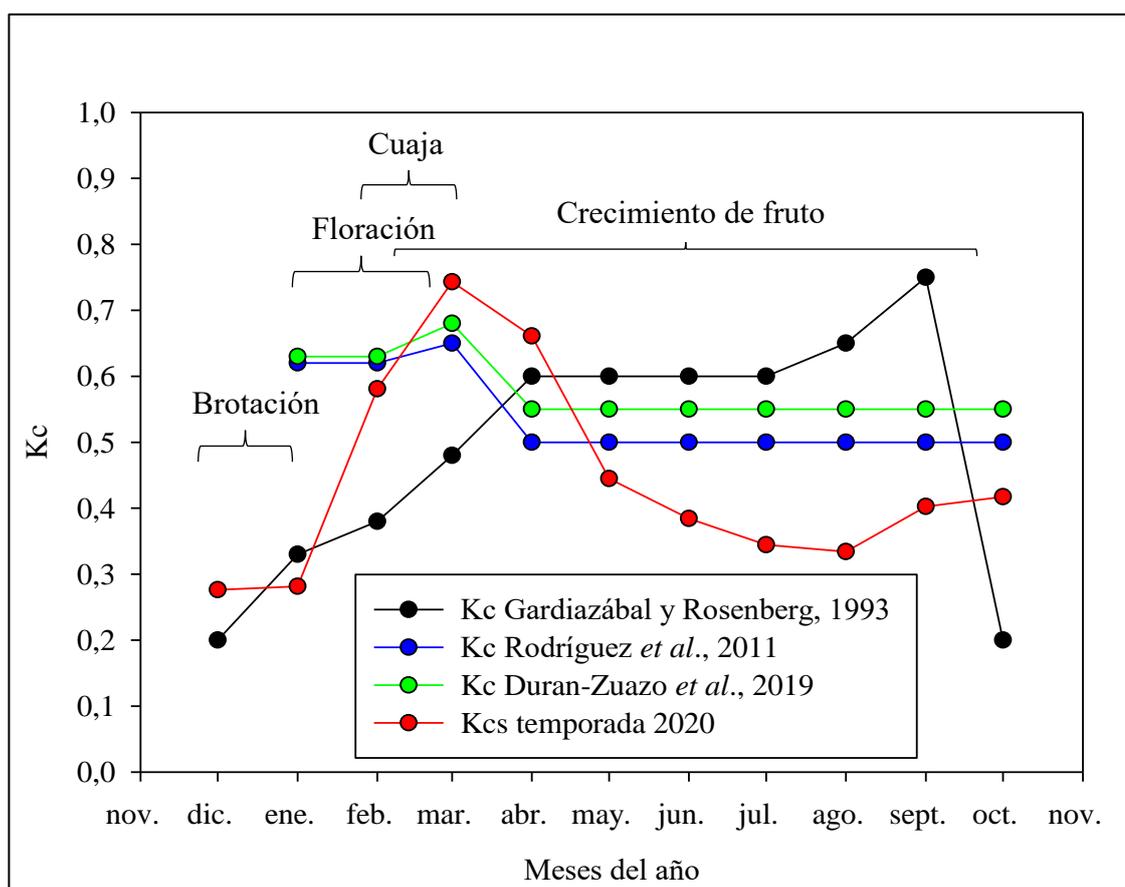


Figura 16. Kcs de la temporada 2020 y diferentes Kc propuestos para *Annona cherimola* Mill.

## Evaluaciones a nivel de planta

### Patrón de consumo diario normalizado

El patrón de consumo diario normalizado evidenció una conducta similar entre tratamientos, donde el mayor consumo ocurrió entre las 11:00 y 17:00 horas, registrándose un bajo consumo al inicio y al final del día (Figura 17).

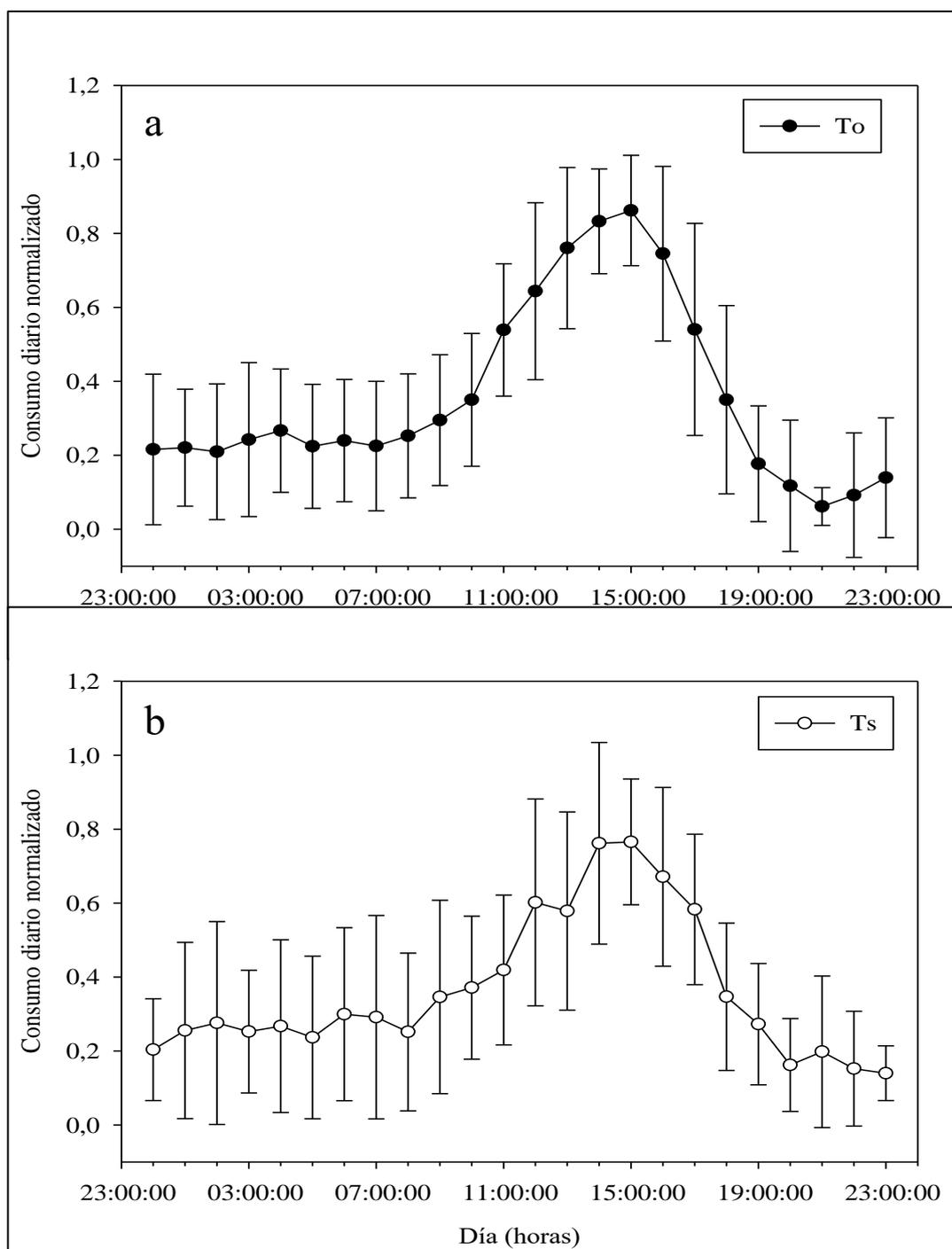


Figura 17. Consumo diario normalizado en el suelo en To (a) y en Ts (b). Media de las repeticiones. Barras verticales corresponden a la desviación estándar.

### Patrón de consumo por profundidad normalizado

El consumo por profundidad (Figura 18), muestra que las plantas tienen una mayor actividad superficial, principalmente en los sensores ubicados entre los 10 y 50 cm de profundidad. Esto concuerda con la descripción de la ubicación de las raíces (Figura 3). Ambos tratamientos disminuyen su actividad en el último sensor, siendo igual para los dos casos.

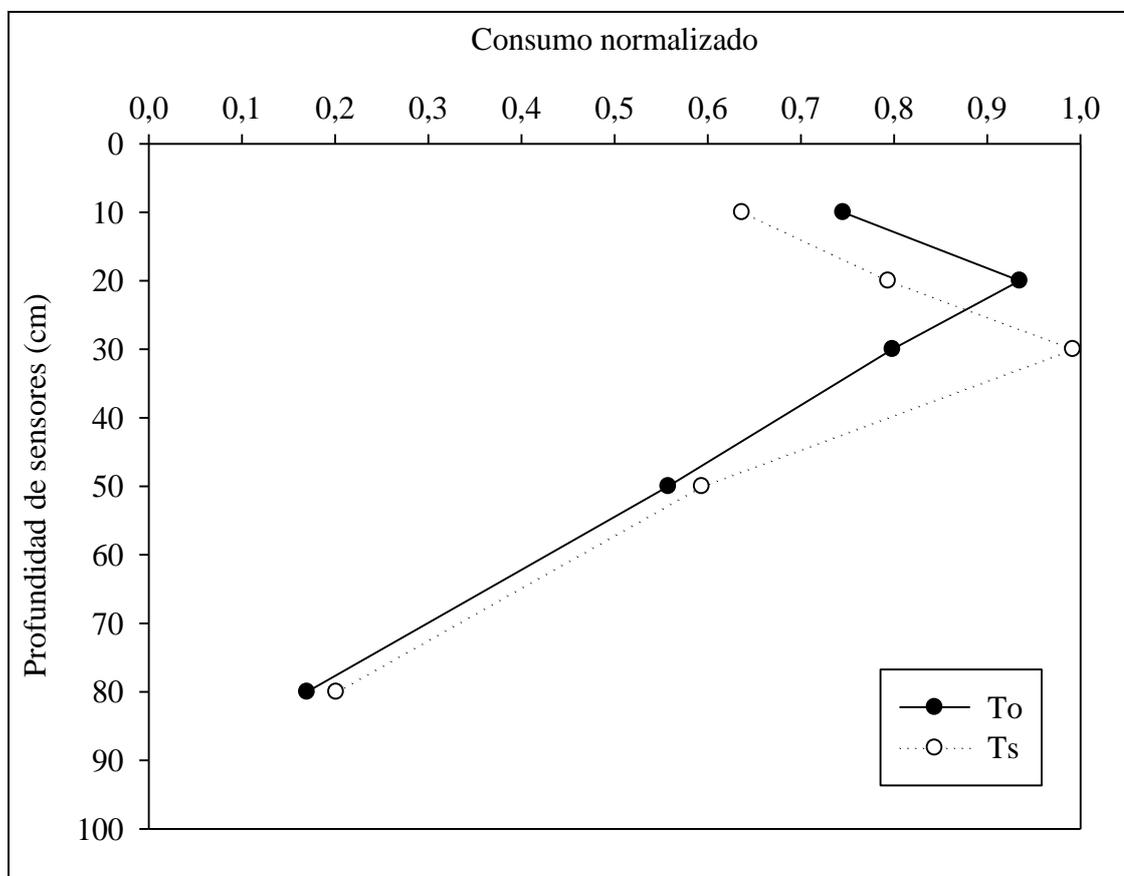


Figura 18. Zona de mayor consumo de agua o actividad por tratamiento en chirimoyos.

### Número de flores polinizadas, número de frutos por árbol y rendimiento

El número de flores polinizadas dentro del ensayo fue homogéneo entre ambos tratamientos. La labor de polinización es manual y dirigida en esta especie, siendo fundamental para alcanzar altos rendimientos. Esto permitió obtener un número similar de frutos a cosecha, no registrándose diferencias significativas por tratamiento. Sin embargo, durante la temporada 2020 la cantidad de flores polinizadas fue menor debido a un cambio en la estrategia de polinización decidida por la empresa (Cuadro 8).

Durante 2019, dado el parejo número de frutos llegados a cosecha y la misma cantidad de flores polinizadas entre tratamientos, el porcentaje de cuaja fue igual entre tratamientos, lo mismo ocurrió con el peso promedio de frutos, por lo que no hubo diferencias significativas de los tratamientos en estos parámetros. En la temporada 2020 Ts presentó un mayor porcentaje de cuaja respecto al To, siendo los demás parámetros iguales.

Cuadro 8. Promedio de flores polinizadas y frutos a cosecha por tratamiento durante las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	Flores polinizadas	Frutos a cosecha	Cuaja	Peso promedio de frutos
	N°	N°	%	g
2019				
To	129,0	75,4	58,4	305,0
Ts	130,3	79,7	61,2	312,9
Significancia	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2020				
To	79,1	44,5	57,7	549,4
Ts	67,5	45,1	68,4	600,2
Significancia	n.s.	n.s.	*	n.s.

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ ), \*: significativo ( $p < 0,05$ )

Respecto a los rendimientos no se obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos para ambas temporadas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Rendimiento por tratamiento durante las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	Rendimiento promedio árbol	Rendimiento potencial
	kg árbol <sup>-1</sup>	ton ha <sup>-1</sup>
2019		
To	21,5	17,2
Ts	24,4	19,5
Significancia	n.s.	n.s.
2020		
To	24,9	19,9
Ts	26,6	21,2
Significancia	n.s.	n.s.

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ )

### Peso y categoría de frutos

En la temporada 2019, ambos tratamientos concentraron el mayor porcentaje de fruta en la categoría de menor peso, sin presentar diferencias significativas entre ellos (Figura 19).

Para esta especie es importante lograr pesos comerciales sobre 300 g para poder ser exportados, de lo contrario es destinada a venta nacional o procesada en la agroindustria, a un menor precio de venta.

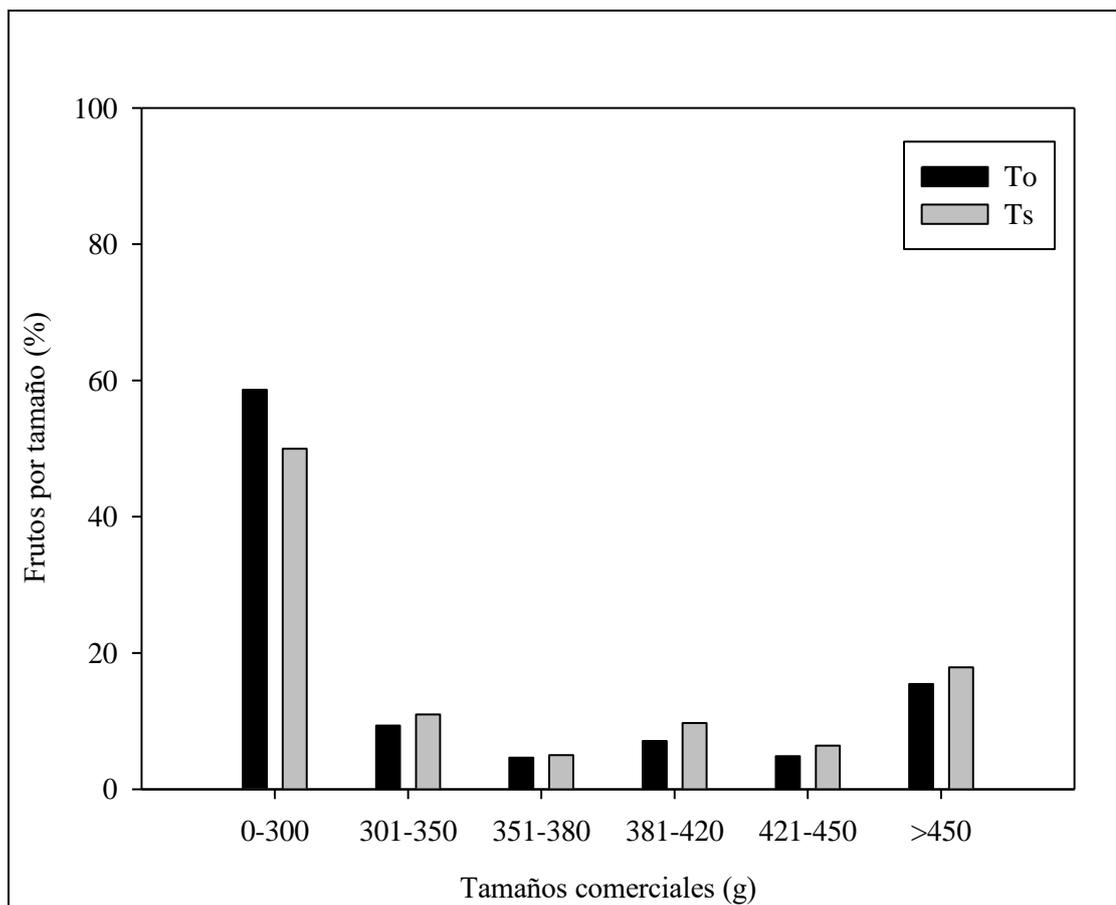


Figura 19. Distribución de tamaños de frutos cosechados entre tratamientos durante la temporada 2019.

En la temporada 2020, el mayor porcentaje de la fruta en ambos tratamientos se concentró en la categoría de mayor tamaño (Figura 20), alcanzando así un rendimiento similar a la temporada pasada, pese al menor número de frutos cosechados.

En ambos tratamientos disminuyó el porcentaje de fruta que se destinó a mercado interno y la agroindustria.

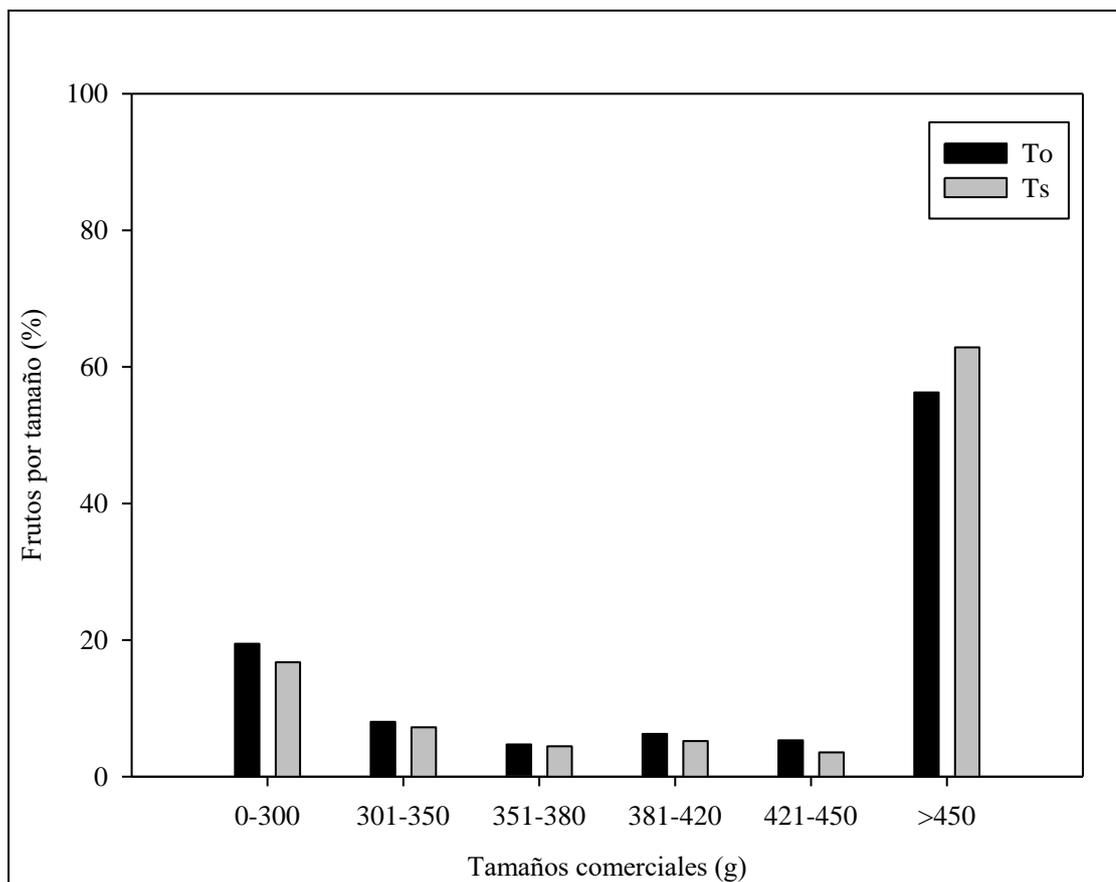


Figura 20. Distribución de tamaños de frutos cosechados entre tratamientos durante la temporada 2020.

### Área sección transversal de tronco (ASTT)

El ASTT medido a inicio de temporada como al final de esta, no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 10), pero si hubo diferencias en el incremento del ASTT para la temporada 2020, en que Ts aumentó más del doble que To, lo cual no ocurrió en la primera temporada.

Cuadro 10. Variación del ASTT en los tratamientos durante las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	ASTT inicial cm <sup>2</sup> árbol <sup>-1</sup>	ASTT final cm <sup>2</sup> árbol <sup>-1</sup>	Incremento ASTT cm <sup>2</sup> árbol <sup>-1</sup>
2019			
To	78,36	81,60	3,23
Ts	77,26	80,54	3,28
Significancia	n.s.	n.s.	n.s.
2020			
To	81,60	83,66	2,06
Ts	80,54	85,86	5,32
Significancia	n.s.	n.s.	*

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ ), \*: significativo ( $p < 0,05$ )

### Peso poda

Se realizó una poda de eliminación de madera no productiva, no encontrándose diferencias en los tratamientos (Cuadro 11). Se evaluó alguna relación entre los valores de ASTT y peso de poda de cada árbol. No se halló una tendencia ni una alta relación.

Cuadro 11. Peso promedio poda y coeficiente de variación por tratamientos en la temporada 2019.

Tratamiento	Peso promedio poda kg árbol <sup>-1</sup>	Coeficiente de variación %
2019		
To	6,2	42,4
Ts	5,2	54,6
Significancia	n.s.	

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ )

Durante la temporada 2020 no se pudo realizar la evaluación producto del COVID.

### Unidades SPAD

El valor promedio para los valores SPAD fue igual entre tratamientos, sin haber diferencias según la cara del árbol, hecho que ocurrió en ambas temporadas como se puede apreciar en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Promedio valores SPAD al momento de cosecha durante las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	Cara Este SPAD	Cara Oeste SPAD
2019		
To	45,33	43,54
Ts	46,92	44,44
Significancia	n.s.	n.s.
2020		
To	44,31	44,14
Ts	46,11	45,67
Significancia	n.s.	n.s.

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ )

## Caracterización de la cobertura vegetal

### Radiación interceptada (PARi) y fracción interceptada (fPAR)

La radiación fotosintéticamente activa interceptada (PARi) no arrojó diferencia significativa entre tratamientos, por lo que los árboles captarían la misma intensidad lumínica en ambos casos, ocurriendo lo mismo para la fPAR, como se observa en la media de estas en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Promedio PARI y fPAR en julio 2019.

Tratamiento	PARI	fPAR
	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	%
To	479,0	59,0
Ts	442,9	59,9
Significancia	n.s.	n.s.

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ )

Durante la temporada 2020 no se pudo realizar la evaluación producto del COVID.

### Seguimiento con imágenes satelitales (NDVI) sector testigo campo

Los valores NDVI se relacionaron con el desarrollo vegetativo del chirimoyo (Figura 21), con valores al alza desde diciembre tras haber comenzado la brotación, alcanzando el máximo en otoño y disminuyendo de manera paulatina posteriormente hasta noviembre, mes en que alcanzó valores bajos dadas las labores de deshoje y poda, dando por terminada la temporada.

En la temporada 2020, los valores mensuales de NDVI iniciaron el periodo con el mismo comportamiento que la temporada 2019, pero a mediados de esta llegó a valores más altos que se mantuvieron durante los siguientes meses, hasta llegar a valores bajos en octubre. Lo anterior fue debido a la alta presencia de malezas en el huerto producto de las lluvias invernales (APÉNDICE I).

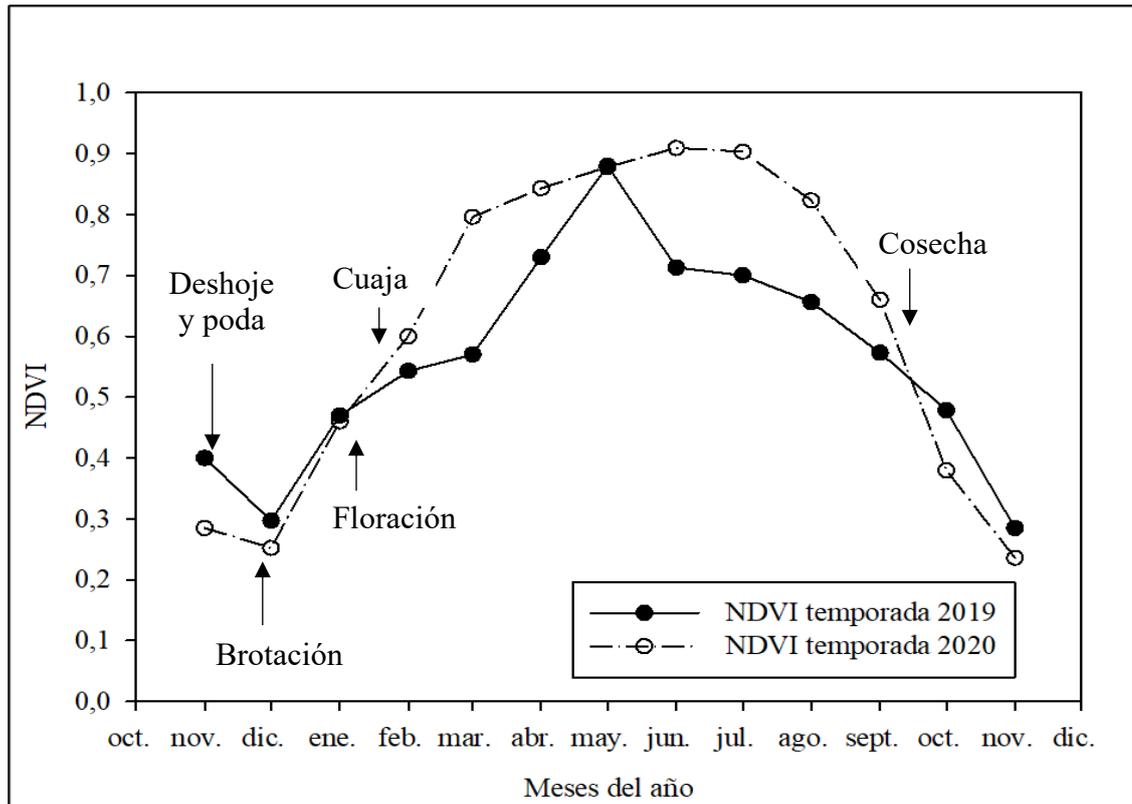


Figura 21. Valores NDVI promedio por mes durante las temporadas 2019 y 2020.

### Relación entre valor NDVI y peso fresco total de hojas del árbol

En el Cuadro 14, se presenta la relación entre los valores NDVI y el peso de las hojas del árbol, obteniendo la función C, con la que es posible predecir el peso fresco del total de las hojas del árbol sin tener que deshojarlo, con un rango de 0,3 a 0,5 de NDVI.

### Relación entre peso fresco de las hojas del árbol y área foliar

Se determinó una alta relación entre el peso fresco, largo, ancho con el área foliar de las hojas, obteniendo un  $R^2$  cercano a 1 (APÉNDICES II, III y IV). Se decidió utilizar el peso de la hoja como predictor del área foliar debido a ser más práctico de evaluar e igual de representativo que las otras variables, obteniendo la función D mostrada en el Cuadro 14.

### Relación entre NDVI y área foliar

Considerando las funciones C y D, se generó la función E que se observa en el Cuadro 14, que puede ser utilizada para rangos entre 0,3 y 0,5 de NDVI.

Cuadro 14. Funciones entre parámetros de caracterización de la cobertura vegetal para la temporada 2020.

Función	Parámetro		Ecuación	$R^2$
	Dependiente	Independiente		
C	Peso fresco total de hojas del árbol (kg)	NDVI	$y = 89,787 x - 21,524$	0,81
D	Área foliar ( $m^2$ árbol $^{-1}$ )	Peso fresco total de hojas del árbol (kg)	$y = 3,7515 x + 0,0009$	0,99
E	Área foliar ( $m^2$ árbol $^{-1}$ )	NDVI	$y = 318,5 x - 75,873$	

### Relación entre NDVI y Kcs

Al relacionar las variables se identificaron tres periodos, cada uno con una función diferente (Cuadro 15). El primer periodo correspondió desde inicio de temporada hasta inicio de otoño (590 °DG acumulados), etapa en que tanto el NDVI y el Kcs fueron en aumento producto del desarrollo vegetativo y el aumento en la ETo (demanda atmosférica), obteniendo la función F. En el segundo ciclo, desde otoño hasta fin de invierno (750 °DG acumulados), la temperatura, la ETo y la demanda atmosférica disminuyeron, pero el NDVI se mantuvo estable, consiguiendo la función G. En la tercera etapa, desde inicio primavera (770 °DG acumulados) hasta fin de temporada, el NDVI comenzó a disminuir y el Kcs disminuyó al final, obteniendo la función H.

Cuadro 15. Funciones entre NDVI promedio y Kcs 2020 para tres periodos en la temporada.

Función	Parámetro		Ecuación	R <sup>2</sup>
	Dependiente	Independiente		
F	Kcs	NDVI	$y = 0,8928 x + 0,0213$	0,80
G	Kcs	NDVI	$y = 0,8185 x - 0,2844$	0,86
H	Kcs	NDVI	$y = 0,3474 x + 0,2043$	0,36

### Generación índices de eficiencia

#### Eficiencia del uso de agua de riego (EUAr)

La EUAr fue entre un 58% y 68% mayor en Ts que en To (Cuadro 16), con una diferencia estadística significativa y muy significativa en la temporada 2019 y 2020, respectivamente.

Cuadro 16. EUAr por tratamiento en las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	Rendimiento promedio	Volumen agua	EUAr	EUAr
	árbol	riego temporada		
	kg árbol <sup>-1</sup>	mm ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>
2019				
To	21,5	591,6	29,1	2,9
Ts	24,4	425,5	46,0	4,6
Significancia	n.s.		*	*
2020				
To	24,9	516,9	37,8	3,8
Ts	26,6	334,6	6,36	6,4
Significancia	n.s.		**	**

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ ), \*: significativo ( $p < 0,05$ ), \*\*: muy significativo ( $p < 0,0001$ )

Debido a la disminución del volumen de agua utilizado en Ts en cada temporada, también se generó un ahorro en los costos de energía eléctrica asociados a la removilización de agua a los goteros. Considerando un costo promedio de \$100 por m<sup>3</sup> de agua removilizada, significó economizar hasta \$182.300 ha<sup>-1</sup> al año (Cuadro 17).

Cuadro 17. Ahorro en costos asociados a electricidad en Ts.

Tratamiento	Ahorro en agua de riego	Ahorro energía eléctrica
	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	\$ ha <sup>-1</sup>
2019		
Ts	1.661	166.100
2020		
Ts	1.823	182.300

### Carga frutal y eficiencia productiva

Tanto en la carga frutal como en la eficiencia productiva no se encontraron diferencias estadísticas, teniendo medias iguales entre los tratamientos en ambas temporadas (Cuadro 18).

Cuadro 18. Relaciones productivas en tratamientos en las temporadas 2019 y 2020.

Tratamiento	Carga frutal	Eficiencia productiva
	N° frutos cm <sup>-2</sup> ASTT	kg cm <sup>-2</sup> ASTT
2019		
To	1,00	0,29
Ts	1,02	0,31
Significancia	n.s.	n.s.
2020		
To	0,60	0,33
Ts	0,56	0,32
Significancia	n.s.	n.s.

n.s.: no significativo ( $p \geq 0,05$ )

## DISCUSIÓN

El uso de sondas de capacitancia y la gestión del riego a través de las Líneas de Gestión (LG), permitió disminuir los volúmenes de agua totales en Ts para la temporada 2019 y 2020, a un 65 y 71% respecto de To, cuyo riego fue determinado mediante el sistema evapotranspiración de referencia – coeficiente de cultivo (ET<sub>o</sub>-K<sub>c</sub>) (Cuadro 6), sin tener efecto en las demás variables.

Esta tecnología consiste en el monitoreo del contenido de agua en el suelo en tiempo real (Vera *et al.*, 2009), generando información horaria. Con estos datos se definieron las LG, con las cuales se mantuvo un contenido de agua óptimo en el suelo para el desarrollo de los árboles (Figura 6), logrando una programación de riego más precisa (Gasque *et al.*, 2016). El comportamiento fue diferente al To o método ET<sub>o</sub>-K<sub>c</sub>, que se basa principalmente en las variables climáticas y el coeficiente de cultivo, el cual puede presentar importantes variaciones respecto de la unidad original en que fue desarrollado (Pereira *et al.*, 2021), promoviendo determinaciones de necesidades de agua de riego por los productores no muy exactas, lo que se observa en la Figura 14.

A pesar de la diferencia en el volumen de agua utilizado entre tratamientos, ambos alcanzaron valores menores a lo registrado por Cautín (2008) en la localidad de Quillota (Región de Valparaíso), quién utilizó 6.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en su estudio. En huertos de chirimoyos en España, el volumen de riego utilizado fue similar al obtenido con Ts (3.970 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) (Durán-Zuazo *et al.*, 2019), pero claramente menor al utilizado por To. Sin embargo, en otros ensayos realizados en España se han registrado volúmenes entre 6.000 a 7.160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (González y Cuevas, 2008; Soler y Cuevas, 2008), siendo superiores a ambos tratamientos. Estas grandes diferencias, dejan de manifiesto que es un cultivo que aún requiere ser estudiado en profundidad, respecto del uso de agua de riego.

El rendimiento frutal de esta especie se define con la labor de polinización manual, tarea que busca mejorar la baja productividad que tienen los árboles en forma natural. Esto ocurre debido a que sus flores son poco llamativas para los insectos y por otro lado, las altas temperaturas y bajas humedades relativas durante el proceso de floración, disminuyen la sincronía de los órganos sexuales, marcando aún más la dicogamia de la especie (Rosell *et al.*, 2006; Cautín *et al.*, 2010; González, 2013; Morales, 2015).

En el ensayo no hubo diferencias entre los tratamientos dado que fueron polinizados bajo la misma estrategia, logrando la misma cantidad de flores polinizadas por árbol en las distintas temporadas (Cuadro 8). Es importante señalar que las cantidades de flores polinizadas fueron entre un 35 a 65% bajo lo sugerido para un árbol entre los 8 a 10 años en producción (Rosell *et al.*, 1997; Flores, 2013).

De esta cantidad de flores polinizadas, hubo un cuajado similar entre tratamientos en la primera temporada, rondando el 60%. Durante la segunda temporada el cuajado aumentó en Ts habiendo diferencia respecto a To (Cuadro 8), que se podría deber al efecto del tratamiento u otras posibles razones, tales como: a) los operarios realizaron una deficiente labor de polinización manual en el To, b) al momento de la poda se realizó una mala selección de madera frutal en algunos árboles, no priorizando ramas débiles y semi vigorosas, las cuales desarrollan flores de mayor calidad (Cautín, 2008) y c) las condiciones climáticas en el momento que se realizó la labor no fueron adecuadas, ya que

se cuenta con antecedentes que al polinizar con alta temperatura ambiental la viabilidad del polen y el porcentaje de cuaja disminuyen (Higuchi *et al.*, 1998).

Los valores de cuaja, que variaron entre 57 a 68%, fueron mayores a los obtenidos por Razeto y Díaz (2001) y Cautín *et al.* (2010), quienes alcanzaron valores de cuajado que variaron entre un 45 a 53% en árboles de la misma variedad en la localidad de Quillota. Sin embargo, los valores son bajos en comparación a chirimoyos “Fino de Jete” en España, los que obtuvieron porcentajes de cuajado sobre el 65% y hasta un máximo de 98,3% (González *et al.*, 2006; González y Cuevas, 2008). La misma variedad en el sur de Italia alcanzó entre un 95 a 100% de cuajado (Dattola *et al.*, 2019). En México, Apolonio *et al.* (2015), registraron los mejores resultados con 87% de cuajado o “amarre de frutos”.

En la temporada 2019, los valores de peso promedio de fruto (Cuadro 8) en ambos tratamientos, se encontraban dentro del rango señalado por González (2013) y Morales (2015) para la especie. Sin embargo, son menores a los alcanzados por Razeto y Díaz (2001), González *et al.* (2007), Solar y Cuevas (2008), Dattola *et al.* (2019) y Durán-Zuazo *et al.* (2019). Siendo similares a los obtenidos por Cautín (2008) y Flores (2013) como promedio.

Para la temporada 2020, el peso promedio en ambos tratamientos aumentó, siendo igual o mayor a lo señalado por los autores. Esto pudo deberse a la menor carga frutal (Cuadro 18), como lo ocurrido en el ensayo de González y Cuevas (2008), en su última temporada de evaluación. Se registró que los árboles con menor carga frutal alcanzaron mayor peso de fruto a cosecha, situación que no ocurrió en las primeras temporadas. Posiblemente fue debido a una menor competencia entre ellos, al estar mejor distribuidos en el árbol y éste tener mayor capacidad de hacer crecer a cada uno de ellos. Esta conducta es similar en otras especies, que por una mayor carga frutal se reduce el tamaño de frutos (Treder, 2010).

Otra potencial razón del aumento de peso fue la mayor acumulación de días grado (°DG) en la temporada (Figura 4b). Según CIREN (1989) debe haber una acumulación de 1.250 °DG desde yema hinchada a cosecha. También Pinillos *et al.* (2013), señalan que para chirimoyos “Fino de Jete”, la mayor calidad en el fruto es alcanzada con una acumulación de 1470 °DG desde la fecha de polinización. Valores no alcanzados en ambas temporadas.

Se hipotetizó que lo sucedido con el peso promedio de frutos, durante la primera temporada, se debió a que la eficiencia productiva en ambos tratamientos (Cuadro 18) sobrepasó el valor sugerido para chirimoyos (0,22 kg cm<sup>-2</sup> ASTT) (González *et al.*, 2007; González y Cuevas, 2008; Soler y Cuevas, 2008). Lo anterior, habría generado que un alto número de frutos no creciera hasta un tamaño comercial suficiente, hecho evidenciado en el porcentaje de frutos pequeños que fue cosechado (Figura 19). Sin embargo, con los datos aportados por la segunda temporada, se descartó esta hipótesis, ya que a una misma eficiencia productiva que la primera temporada (Cuadro 18) se obtuvo fruta de mayor peso (Cuadro 8).

Asimismo, otra posible razón que podría explicar este hecho corresponde a una polinización mal realizada o tardía (González *et al.*, 2007), que pudo tener consigo un bajo número de óvulos polinizados. Esto implicaría una baja cantidad de semillas por fruto, al igual que ocurre con la polinización natural, las cuales sintetizaron una baja cantidad de hormonas vegetales como auxinas y giberelinas (Apolonio, 2013; Apolonio

*et al.*, 2015), necesarias para el crecimiento y desarrollo de los frutos. Para futuros estudios el índice de semillas en frutos debe ser evaluado, ya que existe una alta correlación entre el número de semillas y el peso fresco de fruto en chirimoyo (González *et al.*, 2006; Apolonio *et al.*, 2015; Dattola *et al.*, 2019). También, como se mencionó anteriormente, en la poda pudo no priorizarse el material vegetativo adecuado, que corresponde a ramas débiles y semi vigorosas, las cuales son más fructíferas (Cautín, 2008).

Debido al similar número y peso de frutos llegado a la cosecha, no hubo diferencias en el rendimiento entre los tratamientos. El rendimiento por árbol fue menor a los 39 kg árbol<sup>-1</sup> alcanzados en un huerto en Quillota bajo manejo convencional, formado en eje y con una misma densidad de árboles que el ensayo (Razeto y Díaz, 2001). En España durante diferentes temporadas, se han registrado rendimientos de 36 kg árbol<sup>-1</sup> (Rodríguez *et al.*, 2011), 47,1 kg árbol<sup>-1</sup> (Durán-Zuazo *et al.*, 2019), llegando hasta 210,6 kg árbol<sup>-1</sup> (González y Cuevas, 2008).

Considerando la producción por árbol y la densidad del huerto en estudio, se obtuvo un rendimiento entre 17 y 21 ton ha<sup>-1</sup> (Cuadro 9), valores representativos para un huerto de la especie en la Región de Coquimbo (CIREN y ODEPA, 2018).

En cuanto a las variables vegetativas, el área de sección transversal de tronco (ASTT) de los árboles (Cuadro 10) de 10 años fue menor a la presentada por Soler y Cuevas (2008), en que árboles de tan solo 8 años tenían un ASTT igual a 165 cm<sup>2</sup>. También González y Cuevas (2008) señalan para árboles de 16 años, un ASTT de 550 cm<sup>2</sup> mayor a ambos estudios. Las diferencias se deben a las condiciones climáticas de cada lugar y a los distintos manejos agronómicos que se realizan en los huertos, como la fertilización, el riego, uso de portainjerto y prácticas culturales que influyen en las características de las raíces y la absorción de nutrientes. Estas pueden limitar o facilitar el crecimiento en cualquier especie, por lo que árboles de la misma edad pueden tener diferente tamaño o crecimiento en la temporada (Dalal y Brar, 2012; Kumar *et al.*, 2019), hecho que ocurrió en la segunda temporada del estudio.

Los valores de índice SPAD no variaron entre tratamientos durante las temporadas, fluctuando entre valores de 43 y 47 (Cuadro 12). Estos resultados se condicen con los de una hoja activa, siendo similares a otras especies como frutilla (Martínez, 2015), palto (Ferreira *et al.*, 2008), litchi (Fu *et al.*, 2014), pepino (Cho *et al.*, 2007), duraznero y peral (Díaz, 2014).

La fracción interceptada (fPAR), durante la primera temporada, fue similar entre los tratamientos en invierno (Cuadro 13), momento en que los árboles alcanzaron a ocupar el 59% del espacio asignado. El valor de cubrimiento de suelo se encontraba dentro del rango de fPAR para otras especies con distintas densidades de plantación, como almendro (Zarate-Valdez *et al.*, 2015) a una menor densidad, cerezo (Zhang *et al.*, 2015) a una mayor densidad o manzano (Casadesús *et al.*, 2011) a alta densidad.

El peso de poda en 2019 fue igual en ambos tratamientos (Cuadro 11), evidenciando un crecimiento parejo entre ellos. Los resultados fueron menores a los obtenidos por Razeto y Díaz (2001) en árboles de 8 años, quienes registraron un peso de poda igual a 8,2 kg árbol<sup>-1</sup> en el tratamiento con menor largo de brote (42,5 cm), hasta 14 kg árbol<sup>-1</sup> los de

mayor crecimiento vegetativo. En España, González y Cuevas (2008), indican un peso de poda promedio igual a 74 kg en árboles de mayor tamaño y rendimiento.

En el cuartel del estudio, las propiedades del suelo en los primeros 50 cm de profundidad (Cuadro 3) se encontraban dentro del óptimo para el frutal y no presentaron impedimento para su desarrollo (CIREN, 1989; González, 2013; Flores, 2013). Ello sumado a la implementación de sistema de riego por goteo, el cual promueve el aumento en la densidad radical al ser bien utilizado (Salgado y Lazo, 1997). Esto se refleja en los resultados de mayor consumo por profundidad (Figura 18), que muestran actividad principalmente superficial hasta los 50 cm, decayendo en el último sensor. Esto concuerda con otros autores (Gardiazábal y Rosenberg, 1993; González, 2013; Morales, 2015) que señalan que el sistema radical es muy superficial, pudiéndose encontrar cerca del 98% de las raíces en los primeros 40 cm de suelo, teniendo un sistema radical similar a otra especie subtropical como el palto (Gil, 2004).

Lo anterior demuestra que la ubicación de las raíces es en la zona superficial, como se observa en la Figura 3, razón por la cual el riego debiera enfocarse en mojar esa zona, evitando que haya actividad en el último sensor a 80 cm (figuras 7 y 8). Si este comportamiento del riego no se considera, puede llegar a generar anegamiento, condición que la especie no tolera (Flores, 2013).

Los valores de Kcs encontrados para el periodo de crecimiento de la fruta son, en algunos momentos, bajo y en otros similares al rango señalado por otros autores (Gardiazábal y Rosenberg, 1993; Rodríguez *et al.*, 2011; Durán-Zuazo *et al.*, 2019, Rallo *et al.*, 2021), tal como se muestra en la Figura 16.

El comportamiento de los valores durante la temporada puede ser explicado por la variación en las condiciones ambientales en el sector y la respuesta de los árboles a estas. En el periodo de otoño e invierno la temperatura y el déficit de presión de vapor disminuyen y con ello la transpiración de las plantas (Devi y Reddy, 2018), habiendo una baja ETC.

Además, según Higuchi *et al.* (1999), la conductancia estomática en las hojas del chirimoyo bajo condición de 12 horas de luz de día presenta dos máximos: uno a las 8 am y otro a las 6 pm, siendo mayor el primero. Considerando que la apertura de los estomas depende de la radiación solar (Allen *et al.*, 1998), es importante considerar que en la zona del ensayo y durante el periodo de crecimiento de fruto, los valores de radiación solar fueron bajos desde el amanecer hasta antes del mediodía. Posteriormente se incrementaron (40 a 60%) y se mantuvieron hasta las 15:00 horas, disminuyendo paulatinamente (datos obtenidos desde estación Aeródromo La Florida, La Serena). Por lo anterior, se podría suponer que producto de la baja radiación y apertura estomática no ocurriría el máximo de la mañana, lo que se vería reflejado en la actividad absorbente de las raíces. Esta se incrementó tarde, hacia el mediodía, y mantuvo un mayor consumo hasta las 17:00 horas (Figura 17). Quizás se puede proponer que las plantas en estudio tuvieron una menor tasa de transpiración y un menor potencial productivo, ya que disminuyó la asimilación de CO<sub>2</sub> producto de la menor apertura estomática (Higuchi *et al.*, 1999).

Las condiciones climáticas de la zona de estudio son contrastantes a la de los estudios realizados en Andalucía, España. En dicha zona, el periodo de floración a cosecha para

la especie ocurre en primavera y verano, con una mayor radiación solar (AEMET, 2020), una temperatura media anual de 20°C, una alta humedad relativa (Rodríguez *et al.*, 2018) y hasta 11 mm día<sup>-1</sup> de ETo (Durán-Zuazo *et al.*, 2019). Con estas características climáticas y un correcto riego, se estaría explicando hipotéticamente las posibilidades de una mayor tasa de transpiración y un mayor potencial productivo, con rendimientos de hasta 40 ton ha<sup>-1</sup> (González y Cuevas, 2008).

Otros factores determinantes del Kc y que explicarían los bajos valores Kcs en invierno, son el porcentaje de cubrimiento del suelo por los árboles y la disposición de los estomas en la hoja (Allen *et al.*, 1998). Para lo primero, se señala que árboles con un 70% del cubrimiento al estar completamente desarrollados, puede generar que el valor de Kc de estos sea menor a uno, como lo ocurrido en el ensayo, donde los árboles alcanzaron un 59% de cubrimiento. En cuanto al segundo punto, se indica que especies con estomas en la parte inferior de la hoja presentan valores relativamente bajos de Kc. En el chirimoyo estos se encuentran en mayor densidad en la cara abaxial de la hoja (Awachare *et al.*, 2018).

Utilizar los periodos entre riegos para la estimación del Kcs, donde se simplifica la ecuación a la variación del contenido de agua diario, fue similar al factor de riego desarrollado por Vera *et al.* (2019), en duraznero utilizando sondas de capacitancia. Este factor es el cociente entre el riego aplicado y la ETo para el periodo. Sus resultados concuerdan con los valores de Kc para la especie, al igual que el Kcs con los datos de autores, validando este tipo de información.

Como fue mencionado anteriormente, no hubo diferencias en el rendimiento obtenido entre tratamientos, pero si se logró disminuir el total de agua de riego aplicada en Ts, por lo cual alcanzó, en ambas temporadas, una mayor eficiencia del uso de agua de riego (EUAr) que To (Cuadro 16). El valor también fue mayor a los valores registrados en España por Rodríguez *et al.* (2011) y Durán-Zuazo *et al.* (2019), 1,4 y 3,3 kg ha<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Adicionalmente, se generó un ahorro en los costos al disminuir la cantidad de energía eléctrica utilizada (Kaptein *et al.*, 2019; Vera *et al.*, 2019) (Cuadro 17).

Bajo el contexto de la mega sequía actual que vive Chile, los resultados obtenidos toman gran relevancia, ya que se demuestra que existe el espacio para mejorar la productividad del agua e incluso lograr reducir los costos.

Finalmente, el índice NDVI respondió al desarrollo vegetativo del frutal, con valores que indican presencia de vegetación (Subirá, 2013; Muñoz, 2013) y que son plantas fotosintéticamente activas (Beyá-Marshall y Galleguillos, 2020). Los valores son máximos en otoño, sobrepasando 0,6 para el periodo de máximo desarrollo vegetativo de los árboles. El índice NDVI se relacionó con los valores de peso fresco de hoja de los árboles y también con el área foliar (Cuadro 14), siendo representativo para momentos con bajo índice. Para un mejor uso de esta herramienta, se debe complementar esta información con periodos de mayor índice que no fueron evaluados, abarcando un mayor margen de categorías, hasta todo el periodo de desarrollo del frutal.

Los valores de Kcs, en dos periodos de la temporada, tuvieron una alta relación con los valores de NDVI (Cuadro 15) y como señala Pôças *et al.* (2020), mediante el uso de índices de vegetación se puede tener una herramienta útil para el manejo del riego, bajo

el contexto de agricultura de precisión. También tuvieron una alta relación con los valores de °DG acumulados desde polinización, por lo que con información accesible a los productores, se podría realizar un riego más eficiente, ajustando este a las necesidades del cultivo.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones en que se realizó el estudio, se concluye:

Mediante el cálculo de un balance hídrico, el uso de sondas de capacitancia FDR permite obtener valores de coeficiente de cultivo práctico (Kcs) para este huerto de chirimoyos, los que varían entre 0,27 a 0,74 para los periodos de menor y mayor consumo, respectivamente.

El regar en base a las Líneas de Gestión usando sondas de capacitancia FDR en comparación con el método ETo-Kc, permite un ahorro de agua de riego del 30% y en la misma proporción en los costos de energía eléctrica en la ejecución del riego del huerto.

El ahorro en agua de riego aplicado no genera diferencias en los rendimientos, el peso promedio de fruto o las variables vegetativas evaluadas.

El método de control de riego utilizando sondas de capacitancia FDR en comparación con el método ETo-Kc, contribuye en mejorar la eficiencia del uso de agua de riego hasta en un 68% en chirimoyos.

## LITERATURA CITADA

Abioye, E., M. Zainal., M. Azimi, S. Buyamin, M. Izran, M. Idham, A. Otuoze, P. Onotu and M. Azwan. 2020. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 173:105441.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). 2020. Resumen mensual de la radiación solar. Julio 2020. Madrid, España. Disponible en: [http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/radiacion\\_ozono/radiacion\\_solar/2020/InformeRad\\_Solar\\_2020\\_07.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/radiacion_ozono/radiacion_solar/2020/InformeRad_Solar_2020_07.pdf) (Consultado en abril de 2021)

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 322p.

Apolonio, I. 2013. Influencia de la fuente de polen sobre el amarre y calidad de frutos de chirimoya (*Annona cherimola* Mill.). 102p. Tesis para Grado de Maestro en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Apolonio, I., A. Castañeda, O. Franco, E. J. Morales y A. González. 2015. Influencia de la fuente de polen y su efectividad en la calidad de frutos de chirimoya (*Annona cherimola* Mill.). *Agronomía Costarricense* 39:61-69.

Awachare, C. M., R. M. Kurian, K. K. Upreti and R. H. Laxman. 2018. Morpho-physiological diversity in *Annona* species. *Scientia Horticulturae* 234:58-62.

Balbontín, C., M. Odi, R. Poblete, J. Garrido, I. Campos y A. Calera. 2016. Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Serena, Chile. Boletín INIA N°335. 50p.

Beyá-Marshall, V y M. Galleguillos. 2020. Optimización del riego en paltos y cítricos. Santiago, Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas. Serie Ciencias Agronómicas N°34. 175p.

Callejas, R., J. Vera, C. Kremer, J. Covarrubias, C. Benavides y M. Rioseco. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Santiago, Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas. Serie Ciencias Agronómicas N°28. 112p.

Casadesús, J., M. Mata, J. Marsal and J. Girona. 2011. Automated irrigation of apple trees based on measurements of light interception by the canopy. *Biosystem Engineering* 108:220-226.

Cautín, R. 2008. Propuesta de un nuevo sistema de conducción en alta densidad de cultivo del chirimoyo (*Annona cherimola* M.). Sus efectos sobre factores microambientales, fisiológicos y productivos. 182p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Cautín, R., C. Reig, C. Mesejo, A. Martínez-Fuentes and M. Agustí. 2010. Flowering and fruit set in cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) as affected by the tree-training system. *The Journal of horticultural Science and Biotechnology* 85(6):511-515.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 1989. Requerimientos de clima y suelo. Frutales menores y de hoja persistente. Publicación CIREN N°84. Santiago, Chile: CIREN. 59p.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2018. Catastro frutícola, Región de Coquimbo Julio 2018. Santiago, Chile: CIREN y ODEPA. 44p.

Cho, Y. Y., S. Oh, M. M. Oh and J. E. Son. 2007. Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value. *Scientia Horticulturae* 111:330-334.

Cifuentes, L y F. Meza. 2008. Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile: Centro Interdisciplinario de Cambio Global. 18p.

Cisternas, I., I. Velásquez, A. Caro and A. Rodríguez. 2020. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 176:105626.

Dalal, R. P. S and J. S. Brar. 2012. Relationship of trunk cross-sectional area with growth, yield, quality and leaf nutrient status in Kinnow mandarin. *Indian Journal of Horticulture* 69(1):111-113.

Dattola, A., G. Sortino, V. Vonella, R. Zappia and G. Gullo. 2019. Effect of fruit-set time on the quality performance of *Annona cherimola* Mill. fruit in south Italy. *Scientia Horticulturae* 246:272-278.

Devi, M. J and V. R. Reddy. 2018. Transpiration response of cotton to vapor pressure deficit and its relationship with stomatal traits. *Frontiers in Plant Science* 9:1572.

Díaz, J. 2014. Evaluación de la calidad y rendimiento en frutos de duraznero (*Prunus persica* (L.) Batsch) y peral (*Pyrus comminis* (L.) Batsch) en tres huertos mixtos, afectados por insectos, en Santiago Papasquiari. 107p. Tesis para Grado de Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

Díaz, J. J. 2015. Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Trabajo fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 78p.

Dirección General de Aguas (DGA). 2020. Información Pluviométrica, Fluviométrica, Estado de Embalses y Aguas Subterráneas. Boletín DGA N° 512. Santiago, Chile. Disponible en [https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin\\_diciembre\\_2020.pdf](https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin_diciembre_2020.pdf) (Consultado en enero de 2021).

- Domínguez-Niño, J. M., J. Oliver-Manera, J. Girona and J. Casadesús. 2020. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. *Agricultural Water Management* 228:105880.
- Durán-Zuazo, V., D. Franco, I. García-Tejero, S. Gutiérrez, P. Cermeño and J. J. Pertiñez. 2019. Water use and leaf nutrient status for terraced cherimoya trees in a subtropical mediterranean environment. *Horticulturae* 5(2):46-56.
- Ferreira, R., G. Selles, R. Ruiz, P. Gil y C. Barrera. 2008. Manejo de la clorosis férrica en palto. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Cruz, Chile. Boletín INIA N°181. 59p.
- Flores, D. 2013. Cultivo del chirimoyo. Manual práctico para productores. Impresiones Yrma e Hijos E. I. R. L. Lima, Perú. 45p.
- Fu, X., W. Mo, J. Zhang, L. Zhou, H. Wang and X. Huang. 2014. Shoot growth pattern and quantifying flush maturity with SPAD value in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Scientia Horticulturae* 174:25-39.
- Galán Saucó, V., M. Herrero and J. I. Hormaza. 2014. Tropical and subtropical fruits. *Horticulture: Plants for people and places* 1:123-157.
- Gandhi, G. M., S. Parthiban, N. Thummalu and A. Christy. 2015. Ndvi: Vegetation change detection using remote sensing and gis. *Procedia Computer Science* 57:1199-1210.
- Gardiazábal, F y G. Rosenberg. 1993. El cultivo del chirimoyo. Valparaíso, Universidad Católica de Valparaíso: Facultad de Agronomía. 145p.
- Gasque, M., P. Martí, B. Granero and P. González-Altozano. 2016. Effects of long-term summer deficit irrigation on “Navelina” citrus trees. *Agricultural Water Management* 169:140-147.
- Gil, P. 2004. El cultivo del palto. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Quillota, Chile. 12p.
- Girona, J., J. del Campo and M. Mata. 2010. A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. *Irrigation Science* 29:55-63.
- González, M., E. Baeza, J. L. Lao and J. Cuevas. 2006. Pollen load affects fruit set, size, and shape in cherimoya. *Scientia Horticulturae* 110:51-56.
- González, M., J. J. Hueso, F. Alonso y J. Cuevas. 2007. Mejora de la productividad y calidad del fruto mediante el control de la polinización en chirimoyo. Fundación Cajamar. Almería, España. 18p.
- González, M and J. Cuevas. 2008. Optimal crop load and positioning of fruit in cherimoya (*Annona cherimola* Mill.) trees. *Scientia Horticulturae* 115:129-134.

González, M. 2013. Revisión bibliográfica. Chirimoya (*Annona cherimola* Miller), frutal tropical y sub-tropical de valores promisorios. *Cultivos Tropicales* 34(3):52-63.

Hidalgo, J., M. Pastor y J. C. Hidalgo. 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la zona no saturada del suelo* 6:171-176.

Higuchi, H., N. Utsunomiya and T. Sakuratani. 1998. High temperature effects on cherimoya fruit set, growth and development under greenhouse condition. *Scientia Horticulturae* 77:23-31.

Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. New York, EE. UU. 801p.

Hochmaier, V. 2010. Desarrollo y evaluación de métodos prácticos no destructivos para la estimación del Área Foliar (AF) por árbol y cálculo del Índice de Área Foliar (IAF) en montes de cerezo (*Prunus avium* L.). 68p. Tesis de Maestría. Universidad de Bolonia. Bolonia, Italia.

Hussein, O., J. Mendoza, I. Abrisqueta, L. Tapia, J. Abrisqueta, J. Vera and M. Ruiz. 2008. Soil water content measured by FDR and thresholds for drip irrigation management in peach trees. *Agricultura Técnica en México* 34:313-322.

Kaptein, N., M. E. Light and M. J. Savage. 2019. Sensors for the improvement of irrigation efficiency in nurseries. *Water SA* 45(3):527-535.

Kumar, D., K. K. Srivastava and S. R. Singh. 2019. Correlation of trunk cross sectional area with fruit yield, quality and leaf nutrient status in plum under North West Himalayan region of India. *Journal of Horticultural Sciences* 14(1):26-32.

Larranaga, N., F. J. Albertazzi, G. Fontecha, M. Palmieri, H. Rainer, M. van Zonneveld and J. I. Hormaza. 2017. A Mesoamerican origin of cherimoya (*Annona cherimola* Mill.): Implications for the conservation of plant genetic resources. *Molecular Ecology* 26:4116-4130.

Luzio, W. 2010. *Suelos de Chile*. Editora e Imprenta MAVAL, Santiago, Chile. 360p.

Martín de Santa Olalla, F., P. López y A. Calera. 2005. *Agua y Agronomía*. Ediciones Mundi-Prensa. 606p.

Martínez, F., P. Palencia, C. M. Weiland, D. Alonso and J. A. Oliveira. 2015. Influence of nitrification inhibitor DMPP on yield, fruit quality and SPAD values of strawberry plants. *Scientia Horticulturae* 185:233-239.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). 2019. Datos avances de frutales no cítricos y frutales secos año 2019. Madrid, España. Disponible en: [https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/frutalesnocitricosysecosprovisionales2019\\_tcm30-537041.xls](https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/frutalesnocitricosysecosprovisionales2019_tcm30-537041.xls) (Consultado en julio de 2020).

Ministerio de Obras Públicas (MOP). 2019. Declara zona de escasez hídrica a la Región de Coquimbo. Decreto N°156. Santiago, Chile. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Documentos/DTR%20156.pdf> (Consultado en mayo de 2020).

Morales, A. 2015. Aplicación de resveratrol y 6-bencilaminopurina para incrementar vida postcosecha en chirimoya. 135p. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México.

Muñoz, P. 2013. Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 15p.

Orozco, A. 2010. Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia. *Aqua-LAC* 2(1):56-66.

Pereira, L. S., P. Paredes, D. J. Hunsaker, R. López-Urrea and N. Jovanovic. 2021. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultura Water Management* 248:106697.

Pinillos, V., S. Peinado and M. González. 2013. Fruit development and maturation phenology of “Fino de Jete” cherimoya. *Acta Horticulturae* 975:335-342.

Pôças, I., A. Calera, I. Campos and M. Cunha. 2020. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agricultural Water Management* 233:106081.

Rallo, G., T. A. Paço, P. Paredes, À. Puig-Sirera, R. Massai, G. Provenzano and L.S. Pereira. 2021. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agricultural Water Management* 250:106645.

Razeto, B y E. Díaz. 2001. Efectos de la poda de verano y el anillado de corteza en chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.) var. Concha Lisa. *Agricultura Técnica* 61(2):215-220.

Rodríguez, C., V. Durán Zuazo, J. Francia, J. Muriel and D. Franco. 2011. Monitoring the pollution risk and water use in orchard terraces with mango and cherimoya trees by drainage lysimeters. *Irrigation and Drainage Systems* 25:61-79.

Rodríguez, C., J. Francia, I. García, B. Gálvez, D. Franco and V. Durán. 2018. Avocado (*Persea americana* Mill.) Trends in water-saving strategies and production potential in a mediterranean climate, the study case of SE Spain: A Review. p. 317-346. *In: García, I and V. Durán (eds.) Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment*. Academic Press, Cambridge, Massachusetts, EE. UU.

Rosell, P., V. Galán y P. M. Hernández. 1997. Cultivo del chirimoyo en Canarias. Cuaderno de Divulgación. Consejería de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ginebra, Suiza. 15p.

Rosell, P., V. Galán and M. Herrero. 2006. Pollen germination as affected by pollen age in cherimoya. *Scientia Horticulturae* 109:97-100.

Salgado, E y A. Lazo. 1997. Distribución espacial de las raíces del chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.) cv. Bronceada, bajo riego por goteo y microaspersión. *Simiente* 67 (3-4):113-114.

Sánchez, I., E. Catalán, G. González, J. Estrada y D. García. 2006. Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Agricultura Técnica en México* 32(3):333-340.

Santibáñez, F. 2016. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Ministerio de Agricultura, ODEPA. Santiago, Chile. 60p.

Santibáñez, F., P. Santibáñez y O. González. 2016. Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile. Disponible en: [http://basedigitaldelclima.mma.gob.cl/estudio\\_uno/Informe\\_01\\_08.pdf](http://basedigitaldelclima.mma.gob.cl/estudio_uno/Informe_01_08.pdf) (Consultado en julio de 2020).

Sinclair, T. R., C. B. Tanner and J. M. Bennett. 1984. Water use efficiency in crop production. *American Institute of Biological Sciences* 1:36-40.

Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA). 2018. Anuario Estadístico de Producción Agrícola. Lima, Perú. Disponible en: <http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/datos-excel-anuario-agricola-2018-070819.xls> (Consultado en julio de 2020).

Soler, L and J. Cuevas. 2008. Development of a new technique to produce winter cherimoyas. *HortTechnology* 18:24-28.

Srivastava, L. M. 2002. Plant, growth and development: hormones and environment. Academic Press, London, UK. 772p.

Subirá, C. Zonificación de parcelas frutícolas a partir de índices de vegetación de imágenes del satélite Worldview-2 con fines de agricultura de precisión. Trabajo fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 94p.

Treder, W. 2010. Crop loading studies with “Jonagold” apple tree. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* 18(1):59-69.

Vera, J., O. Mounzer, M. C. Ruiz-Sánchez, I. Abrisqueta, L. M. Tapia and J. M. Abrisqueta. 2009. Soil water balance trial involving capacitance and neutron probe measurements. *Agricultural Water management* 96:905-911.

Vera, J., W. Conejero, M. R. Conesa and M. C. Ruiz-Sánchez. 2019. Irrigation factor approach based on soil water content: a nectarine orchard case study. *Water* 11(3):589-603.

Zarate-Valdez, J. L., S. Muhammad, S. Saa, B. D. Lampinen and P. H. Brown. 2015. Light interception, leaf nitrogen and yield prediction in almonds: A case study. *European Journal of Agronomy* 66:1-7.

Zhang, J., M. D. Whiting and Q. Zhang. 2015. Diurnal pattern in canopy light interception for tree fruit orchard trained to an upright fruiting offshoots (UFO) architecture. *Biosystems Engineering* 129:1-10.

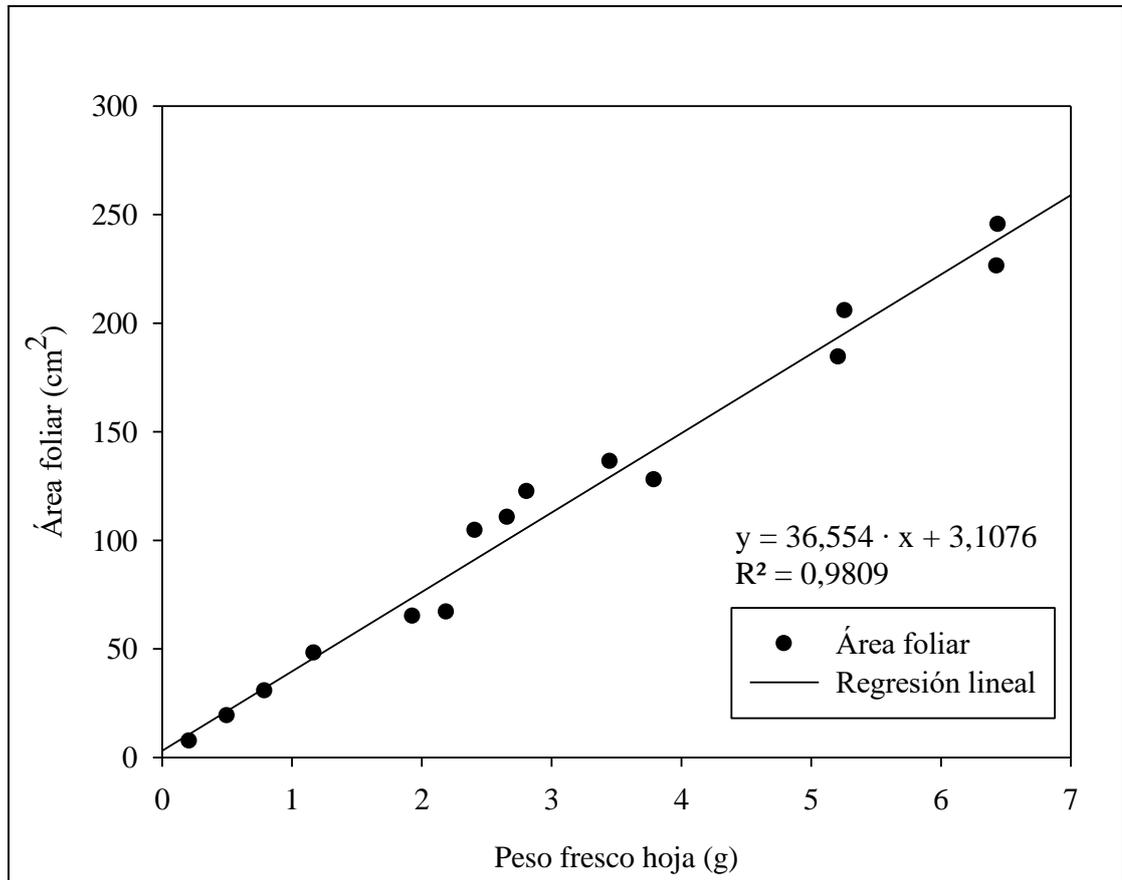
**APÉNDICE I**

Presencia de malezas en el huerto de chirimoyos. Fotografía tomada el 15 de octubre de 2020.



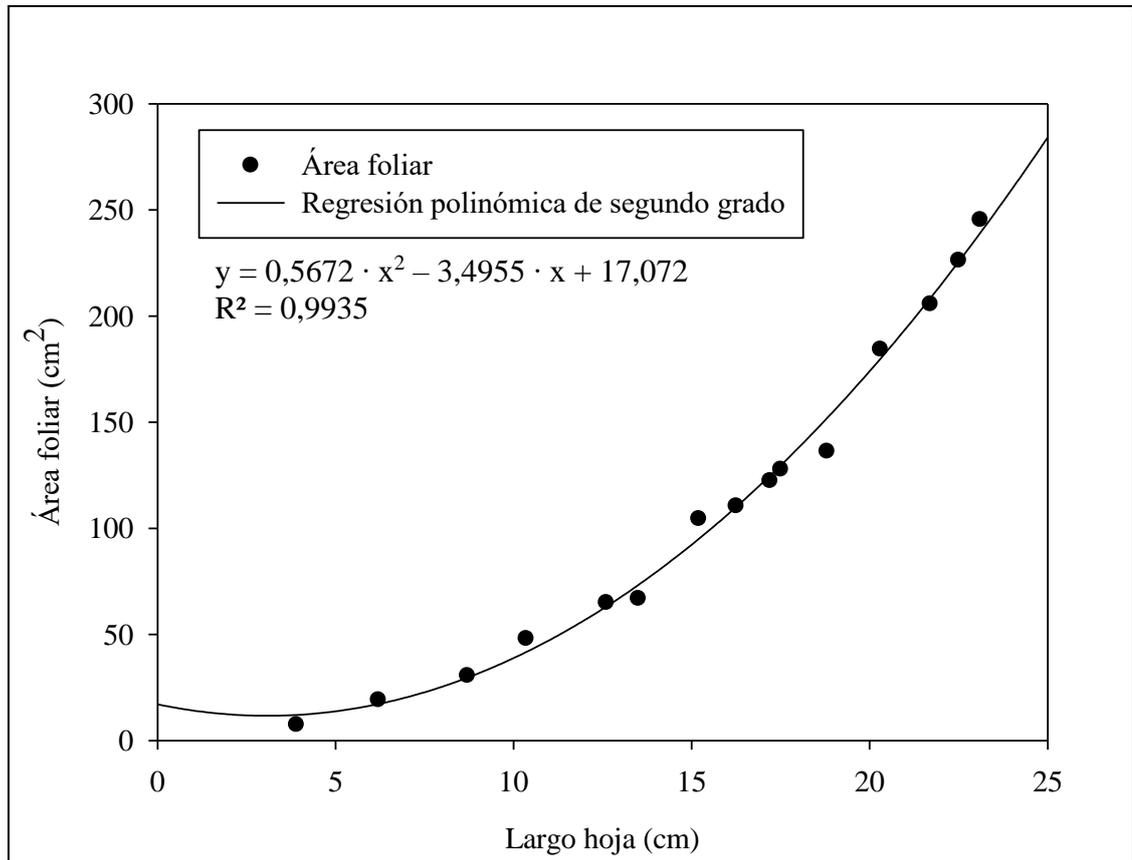
## APÉNDICE II

Determinación del área foliar a partir del peso fresco de las hojas.



## APÉNDICE III

Determinación del área foliar a partir del largo de las hojas.



## APÉNDICE IV

Determinación del área foliar a partir del ancho de las hojas.

