

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE HUMEDAD Y EL CONSUMO DE AGUA
DE AVELLANOS EUROPEOS**

DANIELA ALEJANDRA ABARZÚA TRONCOSO

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL AGRÍCOLA

**CHILLÁN-CHILE
2022**

**EFFECTOS DEL ÁREA HUMEDECIDA EN EL CONSUMO DE AGUA DE
AVELLANOS EUROPEOS**

Aprobado por:

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Eduardo Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Profesor Emérito

Profesor Asesor

Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.
Profesor Asistente

Directora de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Profesor Asociado

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

RESUMEN.....	1
SUMMARY	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo general.....	9
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	10
3.1 Área de estudio.....	10
3.2 Antecedentes generales del sistema de riego.....	11
3.3 Descripción del clima.....	12
4. METODOLOGIA	12
4.1 Distribución de los sensores de humedad de suelo en el sitio Larqui Bulnes.	12
4.2 Evapotranspiración de cultivo	14
4.2.1 Descripción de la estación y sensores utilizados.	14
4.3 Tratamiento de los datos.....	16
4.4 Evaluación de las mediciones.....	17
5.1 Análisis de la tensión de agua en el suelo después de un evento de riego	17
5.2 Análisis temporal de la tensión de agua en el suelo	26
5.3 Análisis temporal del contenido volumétrico de agua en el suelo	36
5.4 Evapotranspiración de cultivo	39
5.5 Análisis de la Evapotranspiración producida luego de un evento de riego.	43
5.6 Análisis de la evapotranspiración temporal del avellano europeo	45
5.7 Interacción de la extracción de agua desde el suelo y evapotranspiración.....	48
5.8 Análisis de la tensión del suelo y evapotranspiración durante los eventos de riego y los días posteriores	50
6. CONCLUSIÓN	52
7. LITERATURA CITADA	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros físico-hídricos del suelo para el sitio denominado Larqui. Fuente: (Souto, 2019).....	11
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Sitio de estudio.....	10
Figura 2. Vista lateral de la distribución de los sensores de humedad de suelo para el sitio de estudio.....	13
Figura 3. Vista de planta de la distribución de los sensores de humedad de suelo para el sitio de estudio.....	14
Figura 4. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 11, 12 y 13 de enero de 2019 (sitio Larqui). Donde 0 cm representa la medición bajo el tronco.....	18
Figura 5. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 22, 23 y 24 de enero de 2019 (sitio Larqui).....	20
Figura 6. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 26, 27 y 28 de febrero de 2019 (sitio Larqui).....	22
Figura 7. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 1 y 2 de marzo de 2019 (sitio Larqui).....	24
Figura 8. Tensión de agua del suelo para los datos de la primera temporada de riego (2017-2018) a profundidades de suelo de 15, 45 y 75 cm representada por el logger A, B y E distanciados a 0, 0.8 y -0.8 m del tronco, respectivamente.....	27
Figura 9. Tensión de agua del suelo para los datos de la segunda temporada de riego (2018-2019) a profundidades de suelo de 15, 45 y 75 cm, representada por el logger A, B y E distanciados a 0, 0.8 y -0.8 m del tronco, respectivamente.....	30

Figura 10. Tensión de agua del suelo para los datos de la tercera temporada de riego (2019-2020) a profundidades de suelo de 15, 45 y 75 cm, representada por el logger A, B y E distanciados a 0, 0.8 y -0.8 m del tronco, respectivamente.....	33
Figura 11. Contenido de humedad volumétrico de suelo (θ) a 5 cm de profundidad de suelo entre y sobre hilera para la temporada de riego 2017-2018 y 2018-2019.....	36
Figura 12. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 11, 12 y 13 de enero de 2019.....	39
Figura 13. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 22, 23 y 24 de enero de 2019.....	40
Figura 14. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 26, 27 y 28 de febrero de 2019.....	41
Figura 15. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 1, 2 y 3 de marzo de 2019.....	42
Figura 16. Evapotranspiración de cultivo (ETc) evaluada en 3 eventos, para 1 y 2 días después de riego.....	43
Figura 17. Evapotranspiración medida por la estación durante la temporada 1 (2017-2018).....	45
Figura 18. Evapotranspiración medida por la estación durante la temporada 2 (2018-2019).....	46
Figura 19. Evapotranspiración medida por la estación durante la temporada 3 (2019-2020).....	47

ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE HUMEDAD Y EL CONSUMO DE AGUA DE AVELLANOS EUROPEOS

ANALYSIS OF MOISTURE PATTERNS AND WATER CONSUMPTION OF EUROPEAN HAZELNUTS

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo analizar los efectos del área humedecida en el consumo de agua de avellanos europeos evaluando la relación existente entre ésta y la evapotranspiración del cultivo con un sistema de riego por goteo, compuesto de 2 laterales por hilera y 8 goteros de $3,8 \text{ L h}^{-1}$ por árbol. El estudio se realizó en un sitio ubicado en la comuna de Bulnes, Región de Ñuble. La humedad en el suelo se midió a través de sensores de resistencia eléctrica de estado sólido, instalados junto al árbol a profundidades de 15, 45 y 75 cm, y a distanciamiento horizontal en dirección oriente y poniente de 80, 130 y 250 cm. La evapotranspiración (ET) se midió con apoyo de una estación denominada ET-full ubicada en el sitio, tomando datos cada 30 min. La ET es determinada por mediciones de los componentes del BES (balance de energía superficial) y las variables micrometeorológicas. Los resultados muestran que la mayor cantidad de humedad se encuentra bajo el tronco y todo el bulbo húmedo cubre el espacio radicular siendo esto muy positivo para el frutal. Finalmente, se demostró que el área humedecida sigue un patrón de comportamiento similar durante las 3 temporadas de riego. Se recomienda continuar explorando patrones de extracción de agua de frutales debido a que son un factor muy importante en la relación rendimiento-agua consumida por el frutal.

ANALYSIS OF MOISTURE PATTERNS AND WATER CONSUMPTION OF EUROPEAN HAZELNUTS

SUMMARY

The objective of this study was to analyze the effects of a moistened area on the water consumption of European hazelnuts by evaluating the relationship between this area and the evapotranspiration of the crop, using a drip irrigation system consisting of 2 laterals per row and 8 drippers of 3,8 L h⁻¹ per tree. The study was carried out in a site located in the district of Bulnes, Ñuble Region. Soil moisture was measured through solid-state electrical resistance sensors, installed next to the tree at depths of 15, 45 and 75 cm, and at a horizontal distance in the east-west direction of 80, 130 and 250 cm. Evapotranspiration was determined by measurements of the BES (surface energy balance) components and micrometeorological variables at intervals of 30 min in a station called ET-full located on the site. The results show that the highest moisture content is found under the trunk, while the entire wet bulb covers the root space, which is highly positive for the fruit tree. Finally, it was shown that the wetted area follows a similar behavior pattern during the 3 irrigation seasons. It is recommended to continue exploring patterns of water extraction from fruit trees because they are a key factor in the relationship between yield and water consumed by the fruit tree.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del agua para fines agrícolas es un tema central en cualquier debate sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria. En promedio, la agricultura ocupa el 70% del agua que se extrae en el mundo, y las actividades agrícolas representan una proporción aún mayor del "uso consuntivo del agua" debido a la evapotranspiración de los cultivos. A nivel mundial, más de 330 millones de hectáreas cuentan con instalaciones de riego. La agricultura de regadío representa el 20% del total de la superficie cultivada y aporta el 40% de la producción total de alimentos en todo el mundo (Banco Mundial, 2008). En Chile no estamos muy lejos de la realidad mundial, en cuanto al uso del agua en la agricultura, cerca de un 70% es destinado a este sector y es uno de los mayores consumidores de agua dulce.

La principal orientación comercial, en Chile, es la exportación, en donde la silvicultura y la fruticultura juegan un rol muy importante en la economía. La orientación comercial se clasifica en tres grandes zonas a nivel país, comenzando por la zona norte, precisamente la tercera y cuarta región en donde predomina la producción de frutales y viñas, que dependen del riego durante todo el año. Luego se presenta la zona central en donde se considera la región de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, agregándose la producción de hortalizas, las cuales también dependen fuertemente del riego. Finalmente a partir de la Séptima región comienzan a aparecer los cultivos anuales, ganadería y silvicultura, que dependen del riego crucialmente en primavera y

verano. Las explotaciones agrícolas se expresan a lo largo de todo el país, encontrándose el 54% de éstas en las regiones del Maule, Biobío y La Araucanía. En el extremo norte, hasta la región de Coquimbo se localiza solo el 8,4% de las explotaciones, y en Aysén y Magallanes las cifras no superan el 1%.

En cuanto al clima, Chile posee una extrema longitud, sumada a otras características como las barreras naturales que forman las cordilleras y las corrientes marinas subtropicales en el norte y polares desde el sur, traen como resultado una gran diversidad de climas en el territorio, los que se expresan tanto en sentido latitudinal como longitudinal. Los climas del país van desde los de tipo desértico en el norte, con precipitaciones promedio de menos de 1 mm año⁻¹, a los templados lluviosos fríos en el extremo sur, con lugares cuyas lluvias superan los 5000 mm año⁻¹. Esto permite una gran variedad de formas de vida animal y vegetal, que son la base del diversificado desarrollo agrícola y forestal del país (ODEPA, 2017). A pesar de lo antes mencionado, el clima ha ido cambiando con el transcurso de los años, elevando sus temperaturas y disminuyendo las precipitaciones, todo esto ocasionado por el cambio climático. Los modelos climáticos actuales proyectan una disminución sustancial sobre el 50% (Dirección meteorológica de Chile) de las precipitaciones en el centro-sur de Chile, extendiéndose al sur de la región, aumentando la escasez de agua ya producida por el cambio climático, esto afecta directamente a toda la agricultura en el país, pero especialmente a los

cultivos y plantas que requieren de una mayor cantidad de agua para su buen desarrollo.

Del total de 75,6 millones de hectáreas que conforman Chile continental, 51.695.732 ha constituyen la superficie asociada a las explotaciones agropecuarias y forestales censadas, de las cuales no más de 35,5 millones de hectáreas están bajo uso agrícola, pecuario y forestal. Sin embargo, debido a factores geográficos y económicos, la superficie de los suelos cultivados es bastante restringida, alcanzando en la actualidad a sólo 2.123.000 ha. Esta superficie se distribuye en 1.303.210 ha utilizadas en cultivos anuales y permanentes, 401.018 ha en praderas sembradas y 419.714 ha en barbecho y descanso (ODEPA, 2017). En cuanto a la superficie total de frutales plantada en el país, para las diferentes regiones, aumentó de 255.780 ha en el año 2006 a 318.505 ha en 2016, con un crecimiento del 25% en dicho periodo. Dentro de este crecimiento sostenido de superficie de frutales en los últimos 10 años, uno de los frutales que han experimentado mayor aumento es el “Avellano europeo” con sus distintas variedades (Barcelona, Tonda di Giffoni, Tonda Gentile delle Langhe, Yamhill, Lewis, entre otras), creciendo en superficie plantada cercano al 290% en la última década. Para el año 2016 ya se alcanzaba una superficie de alrededor de 13 mil ha plantadas, lo que demuestra el gran crecimiento de este frutal, considerando que se inició comercialmente con menos de 100 ha (Ellena et al, 2013).

La mayor parte de los huertos de avellanos europeos plantados a nivel comercial en Chile se concentra principalmente en la zona centro-sur, esto debido a que el clima templado favorece el crecimiento del avellano europeo en la zona. Otro de los factores que más influyen en el crecimiento y productividad, es el suelo, ya que es de gran importancia en la nutrición (agua y nutrientes) y como soporte. El avellano europeo se desarrolla en suelos de preferencia con textura media, pobre infiltración, con buena permeabilidad y evitando suelos estratificados. La distribución del agua en el suelo es preponderante cuando el avellano necesita consumirla, por lo que, dependiendo del sistema y manejo de riego utilizado, se desarrollará de mejor o peor manera.

Debido a la mayor demanda de agua es que los métodos de riego utilizados para distribuir el agua en el suelo han mejorado y adecuado a las necesidades de cada planta. El avellano europeo es uno de los frutales afectados por la falta de agua. La ausencia de pelos radicales en el avellano restringe la capacidad de absorción de agua y hace que la especie sea sensible a daño por sequía. La planta tiene mayores exigencias de humedad en el periodo de crecimiento y maduración del fruto. Algunas características industriales de las avellanas se ven afectadas cuando el sistema y manejo de riego no son adecuados, por ejemplo, el aumento del porcentaje de frutos vanos y el rendimiento al descascarado disminuyen, además de tener efectos negativos en crecimiento, desarrollo y productividad. Engber (2021) indica que el

requerimiento para un huerto adulto se estima entre 7.000 y 8.000 m³ ha⁻¹ temporada⁻¹ distribuidos para cada etapa del cultivo bajo un tiempo determinado.

El agua destinada a riego debe cumplir con, por ejemplo, distribuirse uniformemente sobre el área de riego, suplir los requerimientos de agua de la planta y no sobrepasar la capacidad de almacenamiento de agua del perfil de suelo para impedir que exista percolación profunda. También existen factores que afectan la calidad del riego que se aplican a una planta, como el caudal, la velocidad de infiltración, el tiempo de riego, la humedad del suelo antes del riego, las condiciones climáticas (especialmente en sistemas de riego por microjet y microaspersión), entre otros. En este ámbito es sumamente importante responder la pregunta: ¿dónde debo poner el agua?

La cantidad de agua a aplicar en un huerto de avellano europeo depende de las interacciones suelo-planta-clima. Para estas condiciones, se debe determinar la cantidad de agua evaporada desde el suelo y la cantidad de agua transpirada y utilizada por este árbol frutal (Allen et al, 2006). Para determinar las necesidades de agua a aplicar, mediante riego, se han desarrollado y experimentado diversas metodologías que relacionan elementos del clima, disponibilidad de agua en el suelo y la planta en diferentes estados de desarrollo (Jara y Valenzuela, 1998). El más utilizado hoy en día y considerado el método de referencia para cuantificar la demanda de agua de un cultivo/frutal es el método ASCE - Penman-Monteith (Allen et al, 2005).

El monitoreo de la humedad del suelo puede ser utilizado como elemento principal para manejar el riego o como complemento de un sistema, basado en la determinación de la evapotranspiración (ET) (López-Olivari, 2016). El efecto del contenido de agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración (Allen et al, 2006).

Bajo la condición, que la humedad del suelo afecta el consumo de agua (ET) de un cultivo/frutal y además considerando que el tipo de riego también es un factor que influye en la ET, es necesario responder algunas interrogantes que normalmente son realizadas por los agricultores e investigadores, tales como, ¿La posición en donde se ubican los emisores es relevante para que el frutal se encuentre en condiciones óptimas para su desarrollo?, ¿Existen efectos producidos por sistemas de micro riego en la demanda de agua de avellano europeo?, ¿La frecuencia de riego afecta la demanda de agua del avellano europeo?, ¿La cantidad de área humedecida por sistema de riego es dominante en la demanda de agua del avellano europeo?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar los patrones de humedad en el consumo de agua diario y temporal de avellanos europeos con sistema de riego por goteo.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar el patrón de humedecimiento de suelo en un huerto de avellano europeo con sistema de riego por goteo con dos laterales por hilera.
- Determinar la evapotranspiración de cultivo del avellano europeo bajo riego por goteo.
- Evaluar la relación que se produce entre el área humedecida y la evapotranspiración de cultivo en avellanos europeos con sistema de riego por goteo con dos laterales y 8 goteros por árbol.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Área de estudio

Se escogió un huerto de avellanos de producción comercial, el sitio de estudio denominado Larqui (Figura 1) se encuentra a 5 km al oeste de la ciudad de Bulnes $36^{\circ}42'30,53''$ S, $72^{\circ}21'38,25''$ W; 72 m.s.n.m. (sobre el nivel del mar), este sitio pertenece a la provincia del Diguillín, Región de Ñuble, Chile.

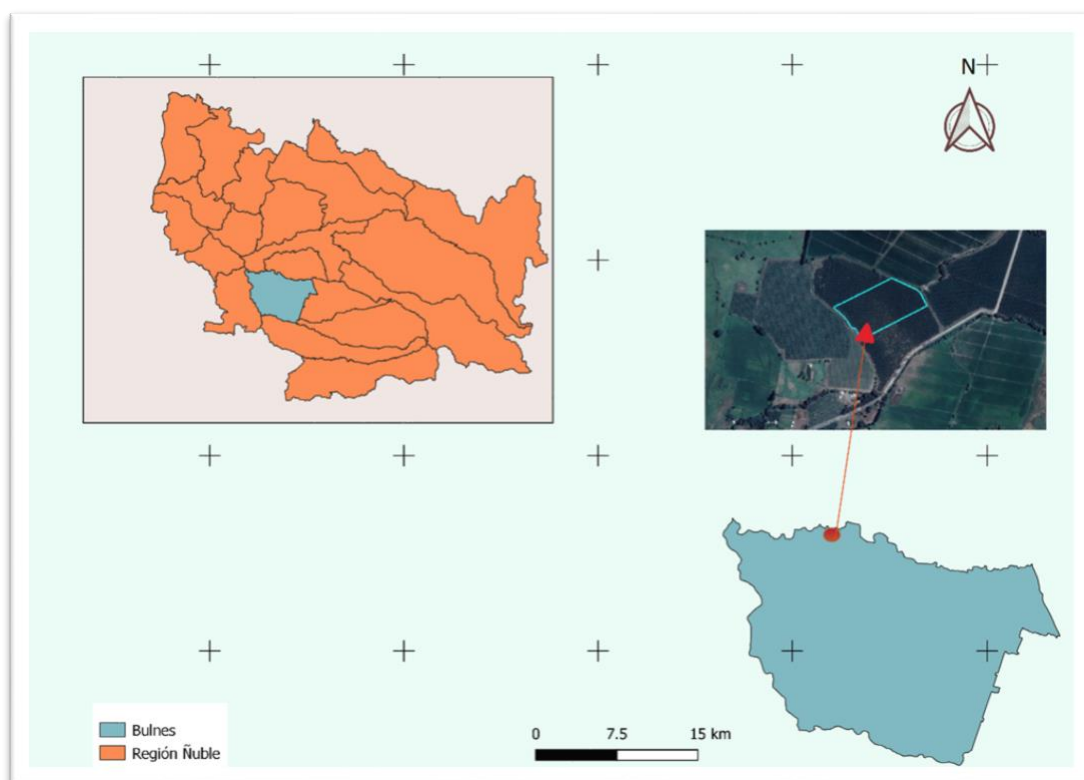


Figura 1. Sitio de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Antecedentes generales del sistema de riego

El sitio está principalmente compuesto de suelo franco arcilloso, su sistema de riego consta de dos laterales por hilera y ocho goteros por árbol (Netafim USA, Fresno, CA, EE. UU) con un caudal nominal de $3,8 \text{ L h}^{-1}$. La variedad de avellano plantado en el sitio es Lewis.

En cuanto a la cosecha de avellanas es imprescindible mencionar que se realiza la segunda quincena de marzo, es una cosecha manual, que luego se deposita en un recipiente en donde son pesadas. El rendimiento de la avellana fresca medida en el sitio fue de 5.450 kg ha^{-1} en 2017-2018 y 5.983 kg ha^{-1} en 2018-2019. Otras características específicas de las avellanas para el sitio de estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros físico-hídricos del suelo para el sitio denominado Larqui.
Fuente: (Souto, 2019).

Variable	Sitio de estudio
Profundidad de suelo (m)	1,0
Pendiente Topográfica (%)	1,0
Año de plantación	2013
Densidad del avellano (árbol ha^{-1})	571
Espaciamiento (m x m)	5,0 x 3,5
Altura del avellano (m)	3,5 a 4,0 en 2017-2018 4,0 a 4,5 en 2018-2019
Superficie del huerto (ha)	4,3
$\theta \text{ CC}$ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,358
$\theta \text{ PMP}$ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,197
$\rho \text{ ap}$ (Mg cm^{-3})	1,29

3.3 Descripción del clima

El sitio de estudio se encuentra en la provincia del Diguillín, la cual posee un clima templado y cálido, la temperatura varía de un máximo de 29,5 °C en enero a un mínimo en Julio de 3,5°C. El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses y la precipitación media anual es de 1.035 mm (Santibáñez et al, 2017).

4. METODOLOGIA

El predio se ubica en la comuna de Bulnes y el huerto tiene un marco de plantación de 5 x 3,5 m, con un sistema de riego por goteo con doble lateral y 8 goteros por árbol, la frecuencia de riego es de 3 días para el mes de noviembre, marzo y abril, mientras que, de diciembre a febrero es de 2 a 3 días.

4.1 Distribución de los sensores de humedad de suelo en el sitio Larqui Bulnes.

La tensión del agua del suelo se mide continuamente a tres profundidades (0,15 m; 0,45 m; 0,75 m), con sensores de resistencia eléctrica de estado sólido (Watermark, Irrrometer Company Inc, Riverside, CA, EE. UU) instalado junto a un árbol (Figura 2).

Como muestra la Figura 2, los puntos donde se ubican los sensores siguen el orden de la hilera, un punto bajo el avellano (A) y los demás a una distancia de 0,8 m (E), 1,3 m (F) y 2,5 m (G) hacia el poniente y a 0,8 m (B), 1,3 m (C) y 2,5 m (D) hacia el oriente. La distancia entre hilera es de 5 m por lo tanto el sensor ubicado a los 2,5 m suele ser llamado el punto seco, debido a que es el punto más alejado del árbol. En la Figura 2 se aprecia que los sensores ubicados en los puntos A, B y E son dispuestos a las 3 profundidades (0,15, 0,45 y 0,75 m), los puntos designados con las letras C y F se ubican a 0,15 m y 0,45 m de profundidad y los puntos G y D son enterrados solo a los 0,15 m. Esta distribución se realiza para monitorear con mayor efectividad el humedecimiento del suelo donde está ubicado el avellano y poder conocer a diferentes profundidades que sucede con el área humedecida sometida a riego por goteo.

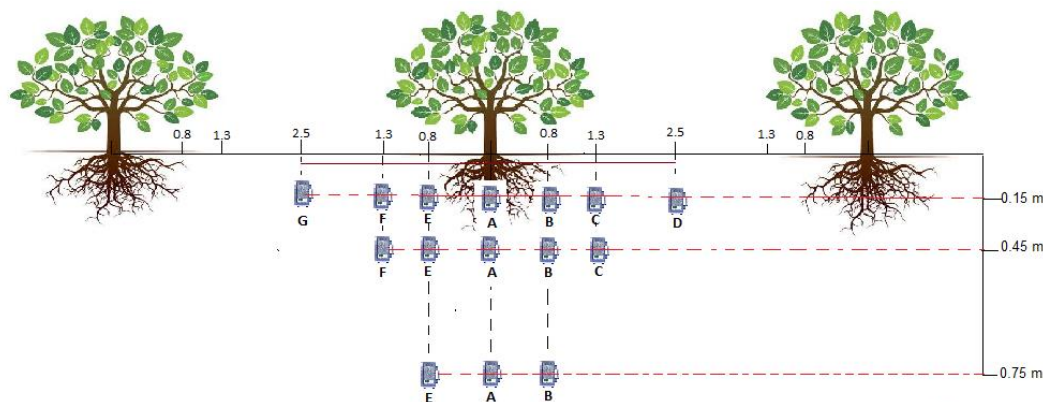


Figura 2. Vista lateral de la distribución de los sensores de humedad de suelo para el sitio de estudio. Fuente: Elaboración propia

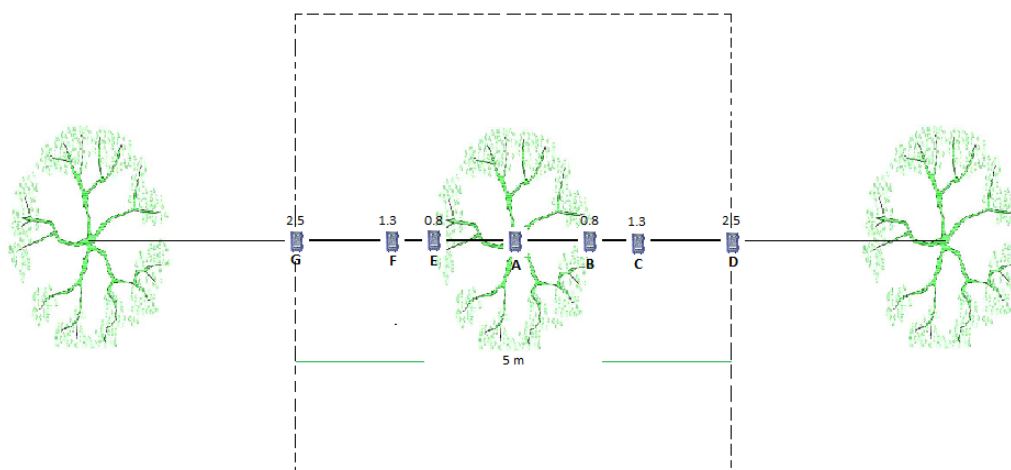


Figura 3. Vista de planta de la distribución de los sensores de humedad de suelo para el sitio de estudio. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Evapotranspiración de cultivo

4.2.1 Descripción de la estación y sensores utilizados.

En el sitio Larqui Bulnes existe una estación Eddy Covariance (estación ET-full) que por diferencia del balance de energía superficial (BES) mide la evapotranspiración. La estación ET-full está compuesta por una torre en donde se mide cada 30 minutos los componentes del BES y las variables micrometeorológicas. Para esto se utiliza un registrador de datos (CR3000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU). La instalación de los sensores fue hecha sobre un marco de montaje con postes de acero y brazos transversales de acero, la altura del montaje es de 5,5 m desde el suelo.

El flujo de calor latente (λE) se calcula con el método BES realizando un balance entre la Radiación neta (R_n), el flujo de calor del suelo (G) y el flujo de

calor sensible (H) medidos en los sitios de estudio con sensores micrometeorológicos.

Los sensores instalados en la estación ET-full consisten en, un anemómetro sónico tridimensional (81000, R.M. Young Inc., Traverse City, MI, EE. UU.) para medir H con la metodología Eddy Covariance (EC), montado aproximadamente a 1,5 m por encima de la canopia; dos radiómetros netos (NRLite2, Kipp y Zonen Inc., Delft, Países Bajos) para medir R_n , un radiómetro neto aproximadamente a 1,0 m por encima de la canopia y un radiómetro neto aproximadamente a 3,0 m por encima del suelo desnudo (entre hileras); dos paquetes de sensores de suelo para calcular G, cada uno consta de dos placas de flujo de calor del suelo (HFP01SC, Hukseflux, Delft, Países Bajos) instaladas horizontalmente a 0,08 m por debajo de la superficie del suelo; un sensor de humedad del suelo (CS616, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU.) instalado a 0,05 m de profundidad y cuatro sondas de temperatura del suelo (TCAV, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU.) dispuestas en un ángulo de 0,06 m a 0,02 m de profundidad y se distribuyen a ambos lados del sensor de flujo de calor del suelo y del sensor de humedad.

La estación ET-full incluye también un pluviómetro (TR-525M, Texas Electronics, Dallas, TX, EE. UU.) y una sonda de temperatura y humedad relativa del aire (HC2S3, Rotronic Hauppauge, Nueva York, NY, EE. UU.), los sensores van montados aproximadamente a 1,0 m por encima de la canopia. Como se mencionó, se utilizan dos paquetes de sensores para conseguir el valor de G, en donde, el primer paquete de sensores de suelo está ubicado en

una hilera de árboles, mientras que el segundo paquete se posiciona debajo de ellos entre las filas. Finalmente, el cálculo del flujo de calor del suelo se obtiene utilizando la media de ambas mediciones del sensor HFP01SC.

La energía para el funcionamiento de los sensores la proporciona un panel solar de 100 W conectado a una batería de 70 Ah que sirve para almacenamiento de energía.

4.3 Tratamiento de los datos

El tratamiento de datos se realiza a través del programa RStudio. Este es un entorno y lenguaje de programación que se enfoca en el análisis estadístico. Con la ayuda de RStudio se realiza un código para ordenar los datos extraídos tanto de los sensores de humedad, como de la estación ET-full, de donde se obtienen datos medioambientales como la temperatura del aire y del suelo, velocidad de viento, humedad relativa, entre otros.

Los datos almacenados cada 30 minutos, son procesados en el código generando los resultados mostrados en esta tesis.

4.4 Evaluación de las mediciones

Los datos obtenidos en esta tesis son analizados estadísticamente mediante la desviación estándar (σ), con la cual se conoce que tan dispersos están los datos respecto al promedio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (1)$$

donde, X_i es el valor observado, \bar{X} es el promedio de los valores observados y N es el número total de observaciones.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de la tensión de agua en el suelo después de un evento de riego

La Figura 4, 5 y 6 muestran los resultados de los valores de tensión (en cb), obtenidos por los sensores dispuestos a diferentes profundidades de suelo (15, 45 y 75 cm) y distanciamiento del tronco del avellano (-2,5; -1,3; -0,8; 0; 0,8; 1,3; 2,5 m) para 4 eventos de riego realizados en la temporada 2 (2018-2019).

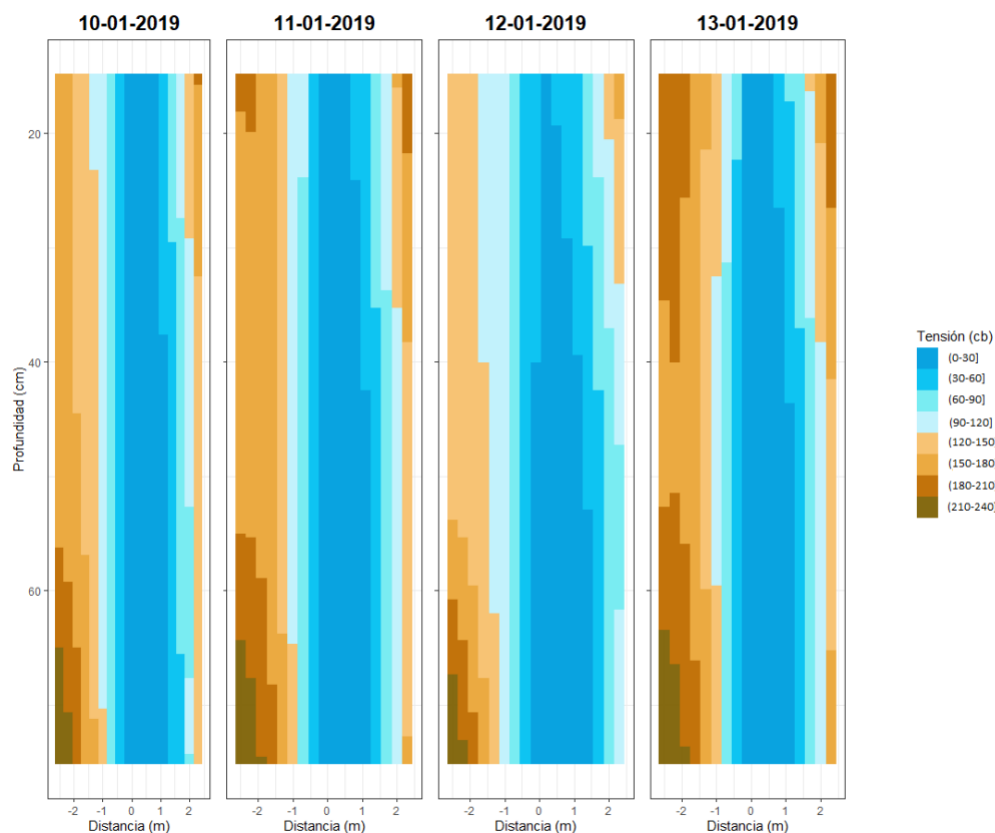


Figura 4. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 11, 12 y 13 de enero de 2019 (sitio Larqui). Donde 0 cm representa la medición bajo el tronco.

El 10 de enero de 2019, es decir, un día antes del riego el suelo se encuentra con tensiones menores en los lugares más alejados del tronco en los primeros 20 cm y después de los 60 cm bajo tierra, pero la franja de mayor humedad es

más extensa horizontalmente en los primeros 25 cm. El día 11 de enero se efectúa el riego en el sitio Larqui y como muestra la Figura 4 (11-01-2019) ese es el estado del suelo durante el riego, el cual presenta un aumento de humedad bajo el tronco apreciándose que la franja de mayor humedad es más gruesa. El día siguiente del evento de riego (Figura 4, 12-01-2019) la mayor cantidad de humedad existente en el suelo se presenta bajo el tronco, tendiendo a infiltrarse a las capas inferiores de suelo debajo de la zona de raíces, haciéndose más extensa horizontalmente en los 70 cm de profundidad. También se observa que la humedad (representada por tonalidades celestes) avanza en sentido vertical y distanciamientos desde el tronco entre 1,5 y 2,5 m presentan una tensión del suelo mayor por lo que las capas de coloración café tienden a ser de una tonalidad más clara en la superficie de suelo y más oscuras a profundidades de 50 cm.

Para dos días después de riego (Figura 4, 13-01-2019) se tiene que la humedad del suelo se concentra nuevamente bajo el tronco extendiéndose en forma horizontal, pero ya en menor cantidad que el día anterior, puesto que se observan mayores tensiones a medida que se aumenta el distanciamiento desde el tronco (coloraciones cafés claras a oscuras), representando así que el suelo cada vez se torna más seco y la humedad se está perdiendo hacia los extremos horizontales del gráfico, alcanzando los 90 cb de tensión a 85 cm desde el tronco.

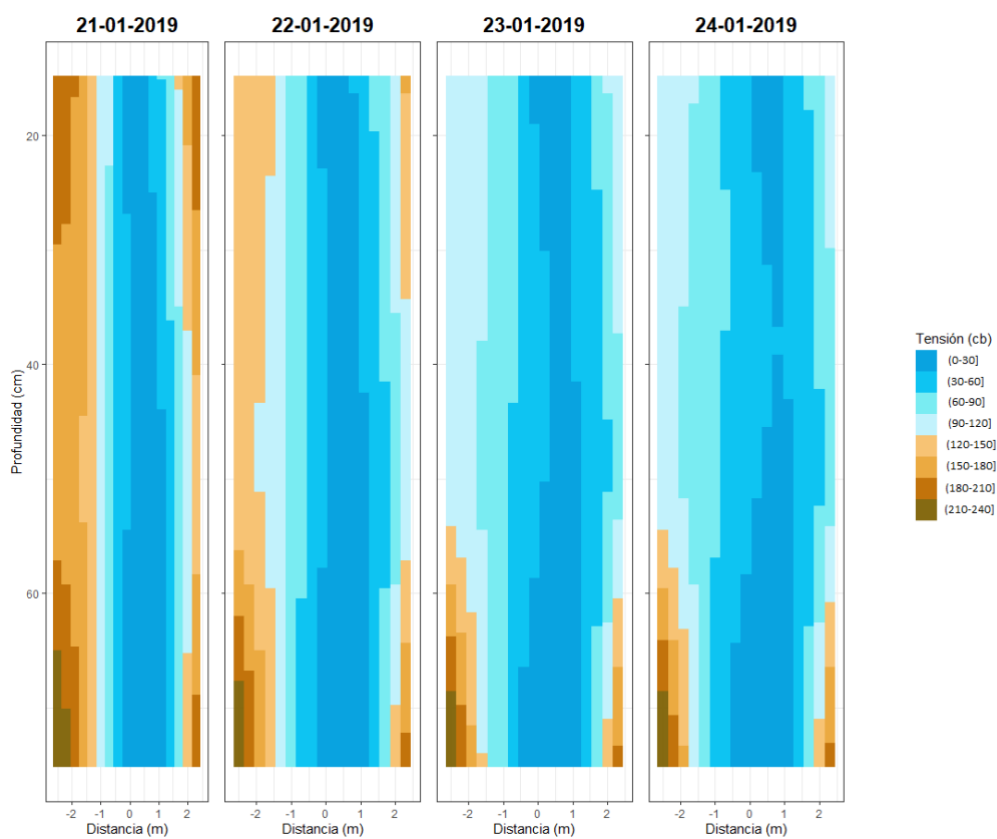


Figura 5. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 22, 23 y 24 de enero de 2019 (sitio Larqui).

En la Figura 5 el día antes de riego (21-01-2019) se observa claramente que presenta un suelo más seco debido a la coloración café clara y oscura en los extremos que representa una tensión mayor, por lo tanto, se necesita mayor fuerza para extraer agua desde ese lugar y la franja de humedad es más pequeña horizontalmente. El evento de riego se efectuó el día 22 de enero de

2019, como se observa en la Figura 5 (22-01-2019) bajo el tronco del árbol se encuentra el área más humedecida con valores de tensión que no superan los 40,5 cb.

Para el primer y segundo día después de riego (Figura 5, 23-01-2019 y 24-01-2019 respectivamente), claramente los primeros 55 cm de profundidad se mantienen en la coloración celeste a lo largo de todo el espaciamiento, pero a medida que se aleja del tronco los valores de tensión aumentan llegando a alcanzar los 120 cb aproximadamente indicando que esas zonas se encuentran con escasa humedad. Después de los 50 cm de profundidad se comienzan a apreciar zonas con un suelo peligrosamente seco en los extremos horizontales del gráfico superando los 150 cb de tensión. Dos días después de riego (Figura 5, 24-01-2019) ocurre que, bajo el tronco a una profundidad de 40 cm, existe una diferencia en la coloración que indica que esa franja de suelo presenta un aumento en la tensión, lo que se genera debido a la extracción radicular a esa profundidad, y luego en sentido vertical recupera la humedad nuevamente. La humedad bajo el tronco en este evento de riego logra infiltrarse más allá de los 70 cm de profundidad.

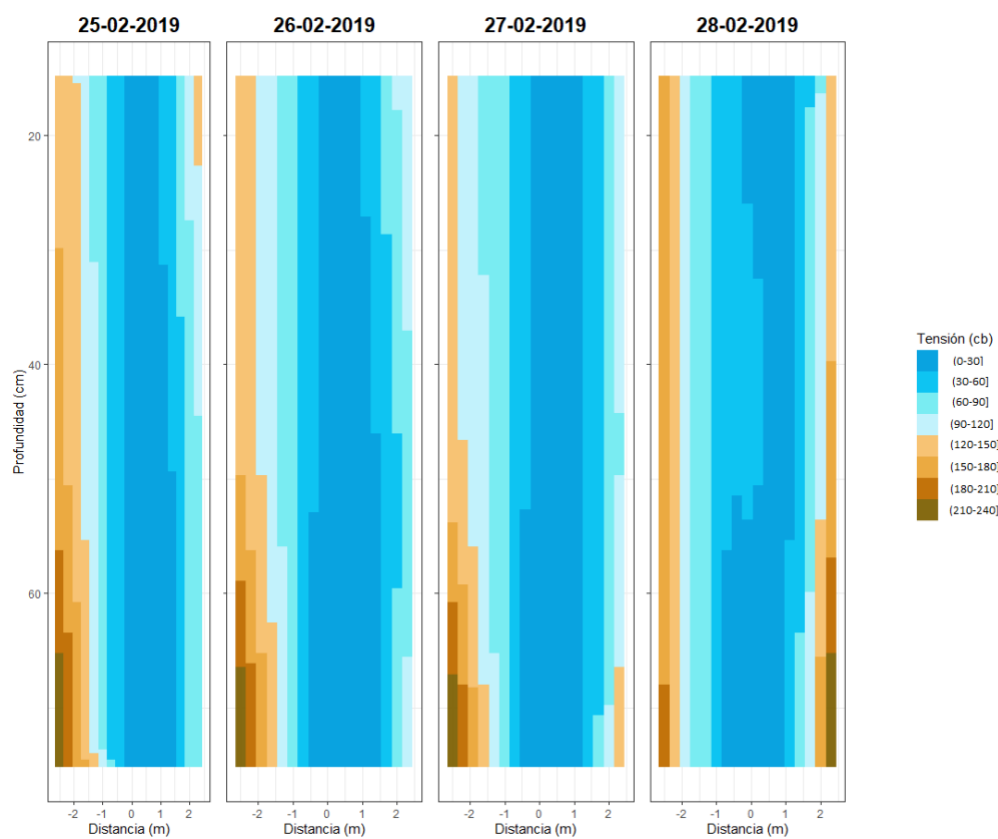


Figura 6. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 26, 27 y 28 de febrero de 2019 (sitio Larqui).

A fines de febrero se efectuó otro evento de riego como se aprecia en la Figura 6 (26-02-2019), allí se observa el estado del suelo durante el riego. El día antes del evento de riego (25-02-2019) presenta condiciones de humedad no tan desfavorables aunque mínimamente se observa que existe un mayor porcentaje de suelo más seco con respecto al día 26, la humedad bajo el tronco es menor que la efectuada el día de riego. Al día siguiente del riego

(Figura 6, 27-02-2019) se observa una franja uniforme de humedad bajo el tronco del árbol y a medida que se avanza en línea horizontal se ve que los valores de tensión van aumentando hasta superar incluso los 100 cb presentando un suelo más seco en la zona poniente. El segundo día después de riego (Figura 6, 28-02-2019), la humedad ya no está presente en los distanciamientos de 2 m en ambos sentidos. Se observa que la humedad se ha infiltrado a las capas más profundas del suelo y que la humedad disminuye bajo el tronco, cercano a los 40 cm de profundidad mostrando que la franja húmeda inicial se hace más delgada, considerando la profundidad radicular del avellano (40-50 cm), es en esta zona donde se extrae el agua que se intercambia con el ambiente. La humedad para el día 28 de febrero logra extenderse horizontalmente a partir de los 45 cm de profundidad en la zona poniente, pero si se observa la zona oriente, ocurre lo contrario debido a que los tonos cafés más oscuros se hacen presente.

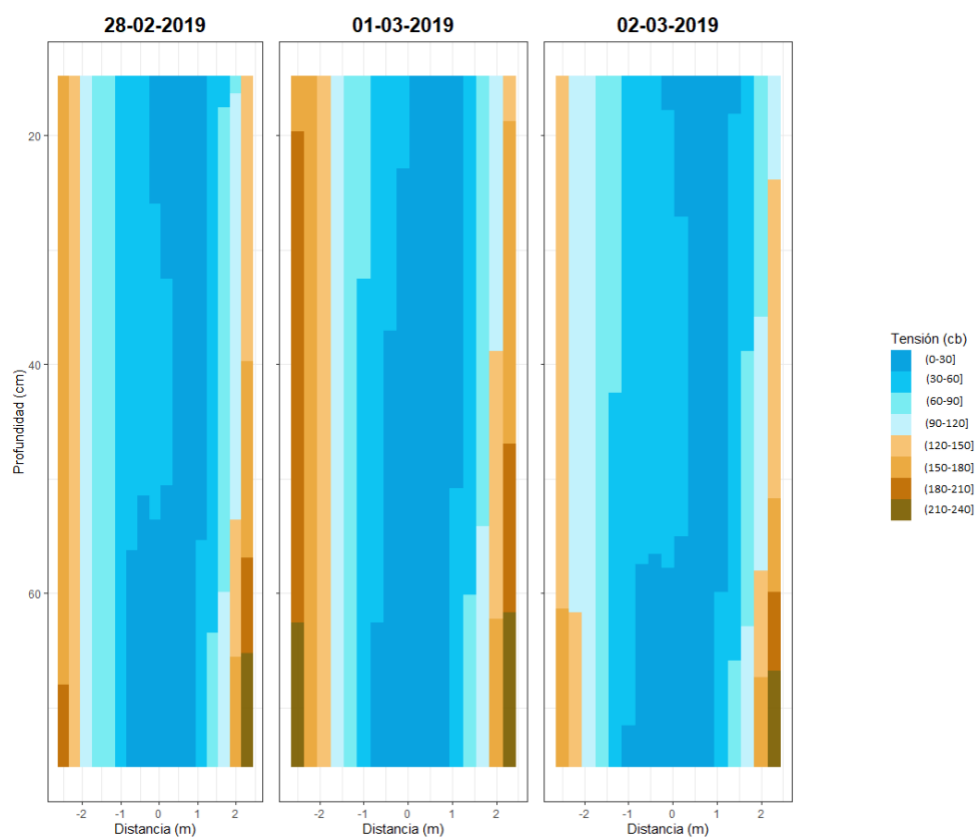


Figura 7. Comportamiento de la tensión de agua del suelo franco arcilloso (cb) a profundidades de 15, 45 y 75 cm con respecto a diferentes distancias desde el tronco del avellano para los días 1 y 2 de marzo de 2019 (sitio Larqui).

La humedad del suelo se comporta de manera creciente pasando del 28 de febrero al 01 de marzo (día de riego), pero la presencia de suelo seco se encuentra con mayor intensidad en los extremos el día 01. Como se observa en la Figura 7 (01-03-2019) se efectuó un evento de riego y muestra cómo se encuentra el suelo bajo el avellano durante este día. Un día después de riego

(Figura 7, 02-03-2019) se observa que la zona más húmeda se inclina hacia el oriente cercano a los 100 cm de espaciamiento del tronco. Entre los 20 y 60 cm de profundidad bajo el frutal se expresa una tonalidad celeste más claro que representa una tensión de 40 a 67 cb, lo que indica menor presencia de humedad en esa zona, bajo los 60 cm de profundidad se recupera la humedad de suelo bajo el tronco con tensiones inferiores a los 40 cb. En los extremos horizontales se tiene que los valores de tensión disminuyen en comparación al día de riego (Figura 7, 01-03-2019).

La humedad avanza verticalmente bajo el tronco, superando la zona de extracción radicular, en donde el agua se infiltra a mayores profundidades, y a medida que se avanza en forma horizontal se pierde humedad debido a la formación de las raíces, siendo éstas quienes extraen agua en esas zonas y debido a esto la tensión es más alta y la coloración cambia a tonos celestes más claros.

El avellano es uno de los frutales que tiene mayores exigencias de humedad en el periodo de crecimiento y maduración del fruto, lo que ocurre justamente en la temporada de riego de primavera-verano, debido a esto, el análisis del comportamiento de la humedad de suelo durante un evento de riego se transforma en algo crucial para el desarrollo del frutal.

Se observa que en todos los eventos de riego el agua se infiltra más allá de la zona radicular del avellano que se estima puede alcanzar entre los 50-60 cm

de profundidad, lo que es suficiente para el correcto desarrollo del avellano, también se aprecia que las zonas más alejadas del tronco del árbol permanecen mucho menos húmedas. En general, el bulbo húmedo considerando valores cercanos a los 50 cb alcanza fácilmente los 80 cm en ambas direcciones de espaciamiento, aunque, se aprecia una leve inclinación de la humedad hacia la zona oriente.

Según Lecaros (2018) sobre el efecto del área de humedecimiento aplicando riego por goteo con dos laterales por hilera realizada en manzanos en el año 2018, la humedad del suelo aumenta después del riego en la estrata de 0-30 cm, de igual forma ocurre con el suelo que se está analizando bajo el avellano, la humedad se extiende hacia los costados y aumenta aún más bajo el tronco, debido al manejo del sistema de riego. Otra observación realizada en este análisis es que al dejar de regar se aprecia una gradual disminución de la humedad del suelo, en el caso del avellano principalmente hacia los costados y no bajo el tronco debido a la extracción radical y a la forma que éstas se presentan. El hecho de que en este suelo la humedad (al menos bajo el tronco del árbol) permanezca más allá de la profundidad de las raíces se debe al manejo de riego del sistema, donde la frecuencia de riego durante la temporada se mantiene constante entre 3 y 2 días dependiendo del mes.

5.2 Análisis temporal de la tensión de agua en el suelo

Las Figuras 8, 9 y 10 muestran los resultados de los valores de tensión (en cb) para un perfil de suelo, bajo el árbol y 80 cm a cada lado del tronco del avellano representados para tres temporadas de riego (2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020). Las líneas rojas, azules y negras representan los datos a 15, 45 y 75 cm, respectivamente.

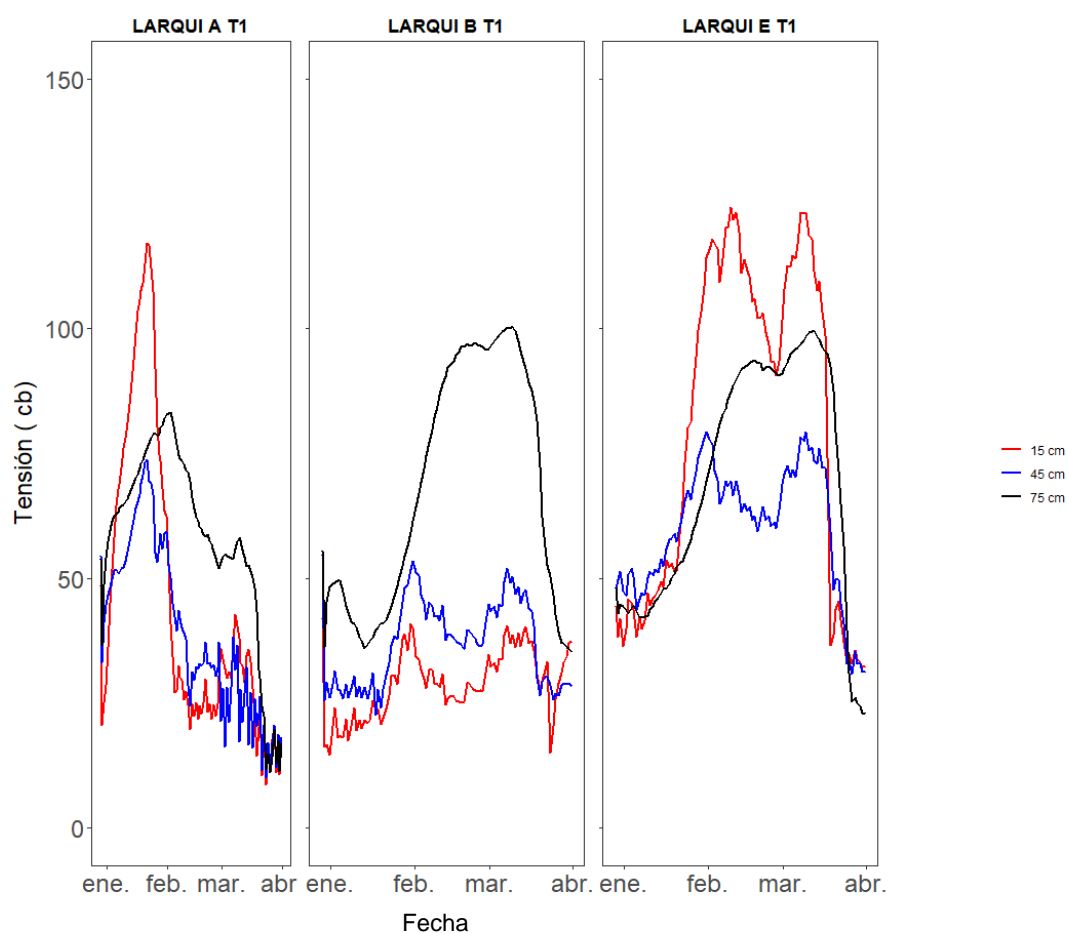


Figura 7. Tensión de agua del suelo para los datos de la primera temporada de riego (2017-2018) a profundidades de suelo de 15, 45 y 75 cm, representada por el logger A, B y E distanciados a 0, 0,8 y -0,8 m del tronco, respectivamente.

La temporada 2017-2018 entrega datos a principios de 2018, puesto que fueron instalados en enero de ese año, en donde se observa que para el sensor ubicado bajo el tronco del árbol (Figura 8, Larqui A T1) los valores de tensión más altos se generan a los 15 cm de profundidad, seguido por los valores a 75 cm y finalmente los valores más bajos se encuentran a los 45 cm. Todas las líneas sobrepasan los 50 cb en algún momento de la temporada, indicando para los 15 cm que entre enero y febrero el suelo obtuvo su pick en intercambio de agua entre las raíces de la planta y la atmósfera, y luego se normaliza bajo los 50 cb que indican un suelo más húmedo. Los datos obtenidos a los 45 cm de profundidad también alcanzan el pick entre enero y febrero, para luego permanecer bajo los 50 cb. En el caso de los datos arrojados a los 75 cm bajo el nivel de suelo se aprecia que se mantiene prácticamente toda la temporada sobre los 50 cb mostrando que a esta profundidad el suelo solo aumentó su humedad llegando al mes de abril.

A los 80 cm de distanciamiento (Figura 8, Larqui B T1) los valores a los 15 y 45 cm de profundidad permanecen toda la temporada bajo los 50 cb, comenzando con niveles de humedad altos y luego llegando febrero y mediados de marzo el suelo presenta menor cantidad de agua (acercándose a los 50 cb), regularizándose en abril con buena humedad producto del cambio de estación (otoño) y la pérdida de hojas del frutal (disminución en ET). En el

caso de los valores a 75 cm de profundidad se mantienen bajo los 50 cb hasta comienzos de febrero y luego presentan un aumento considerable llegando hasta los 100 cb y manteniéndose hasta mediados de marzo, más tarde descienden los valores de tensión indicando mayor cantidad de humedad en el suelo.

El sensor E (Figura 8, Larqui E T1) ubicado a -80 cm del tronco (sector poniente) entrega datos que superan los 50 cb a todas las profundidades siendo a fines de enero donde comienza el aumento de los valores. Lo que podría indicar que los sensores quedaron con adherencia al suelo defectuosa, teniendo problemas con las mediciones. A los 15 cm de profundidad es donde se aprecian los datos más altos de tensión alcanzando un pick de alrededor de 125 cb en los meses de febrero y marzo, pero disminuyendo considerablemente en abril llegando a los 30 cb. El alza de valores de tensión como se mencionó comienza a fines de enero para datos a 75 cm de profundidad, alcanzando los 100 cb y manteniéndose hasta comienzos de abril en donde se observa el aumento de humedad debido a que los valores disminuyen hasta aproximadamente los 25 cb de tensión.

Finalmente, para los datos a 45 cm de profundidad se encuentra que los valores se mantienen bajo los 100 cb, alcanzando los 75 cb aproximadamente en dos pick que ocurren en febrero y mediados de marzo, también aproximándose el mes de abril los valores comienzan a ser más pequeños, indicando que existe mayor cantidad de agua en el suelo puesto que se llega a presenciar valores de 30 cb.

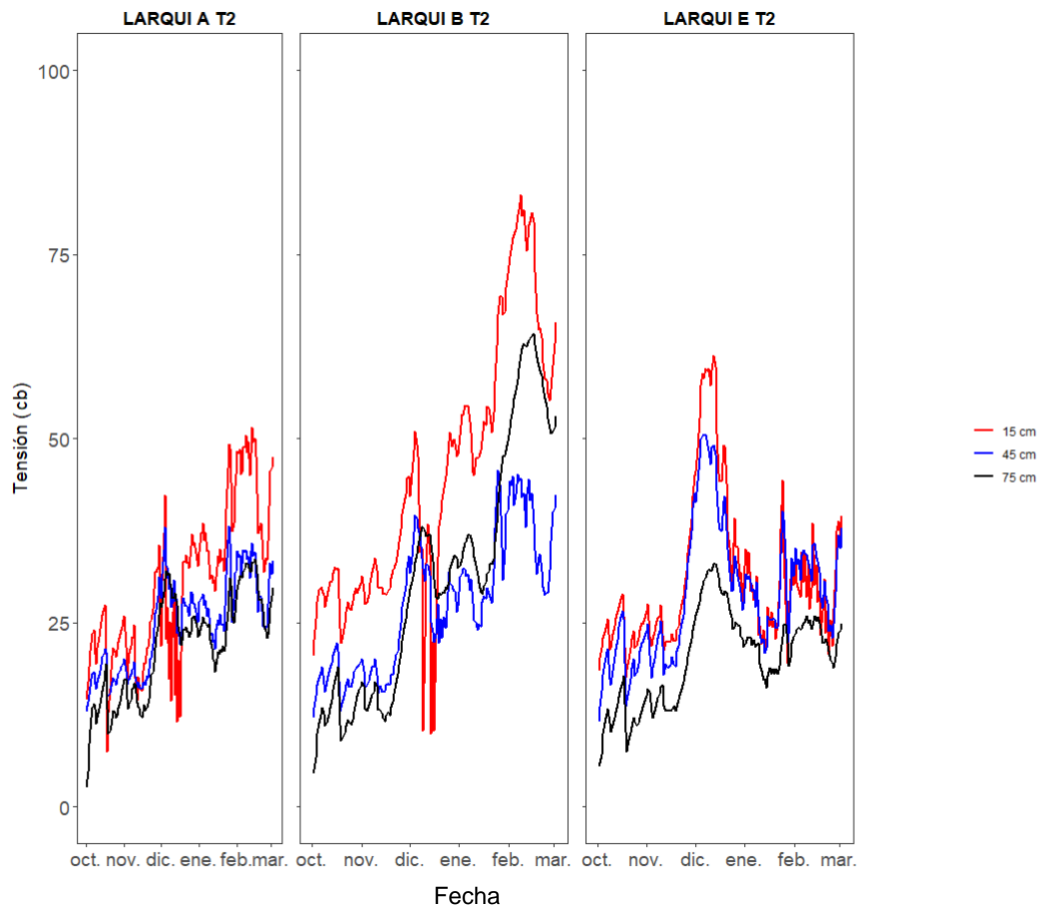


Figura 8. Tensión de agua del suelo para los datos de la segunda temporada de riego (2018-2019) a profundidades de suelo de 15, 45 y 75 cm, representada por el logger A, B y E distanciados a 0, 0,8 y -0,8 m del tronco, respectivamente.

En la Figura 9 se aprecian los datos existentes en los logger A, B y E para la temporada 2018-2019. Dichos datos son útiles para describir la presencia de agua en el suelo a lo largo de la temporada. Comenzando con el suelo bajo el tronco del avellano se observan valores menores a 50 cb en todas las profundidades. Como se observa en la Figura 9 (A, B y E) la tensión en general va en aumentando hacia el mes de marzo, pero durante toda la temporada se mantienen una variación debido al manejo de riego del predio. Los valores más altos son alcanzados al 15 cm de profundidad con 50 cb, seguido por los datos a los 45 cm con 40 cb y finalmente la tensión alcanzada por los 75 cm con 35 cb.

Al analizar los datos del logger B (0,8 cm desde el tronco) (Figura 9, Larqui B T2) se observa que en general todos van en aumento durante el transcurso de la temporada, aquellos que representan los 45 cm de profundidad permanecen bajo los 50 cb durante la temporada, no así, para los 15 y 75 cm. Los valores arrojados a 15 cm bajo tierra son en general ascendentes, pero a mediados de diciembre de 2018 se genera una disminución en los valores (12 cb aproximadamente). Lo anterior no continúa durante mucho tiempo, ya que pronto el suelo comienza nuevamente a perder agua, esto se ve demostrado en la Figura 9, Larqui B T2 sobrepasando los 50 cb de tensión. A los 75 cm de profundidad a medida que transcurre la temporada los valores aumentan, oscilando de acuerdo con el manejo de riego del predio, sobrepasando los 60 cb de tensión a comienzos de febrero del 2019.

En el caso del logger E (Figura 9, Larqui E T2) ubicado a -0,8 m del tronco del frutal, muestra que se comienza con valores inferiores a los 25 cb para las 3 mediciones de profundidad, estos valores comienzan a incrementarse a finales de noviembre. Los valores más altos son alcanzados durante diciembre en los datos tomados a los 15, 45 y 75 cm de profundidad superando los 60, 50 y 30 cb de tensión, respectivamente. Para todas las curvas sucede que a comienzos de enero de 2019 los valores comienzan a descender, manteniendo los valores entre los 25 cb y 40 cb.

En general para la temporada 2, bajo el tronco del árbol se tienen valores bajo los 50 cb de tensión lo que nos permite concluir que la zona está siempre en buena condición de humedad y que el árbol puede sin problemas extraer agua de la zona radicular. Para un distanciamiento de 80 cm del tronco (zona oriente y poniente), se tiene que a 15 cm de profundidad existe mayor intercambio de agua por evaporación, siendo más fácil en las otras profundidades en donde al menos las raíces del avellano pueden llegar a absorber a los 45 cm de profundidad.

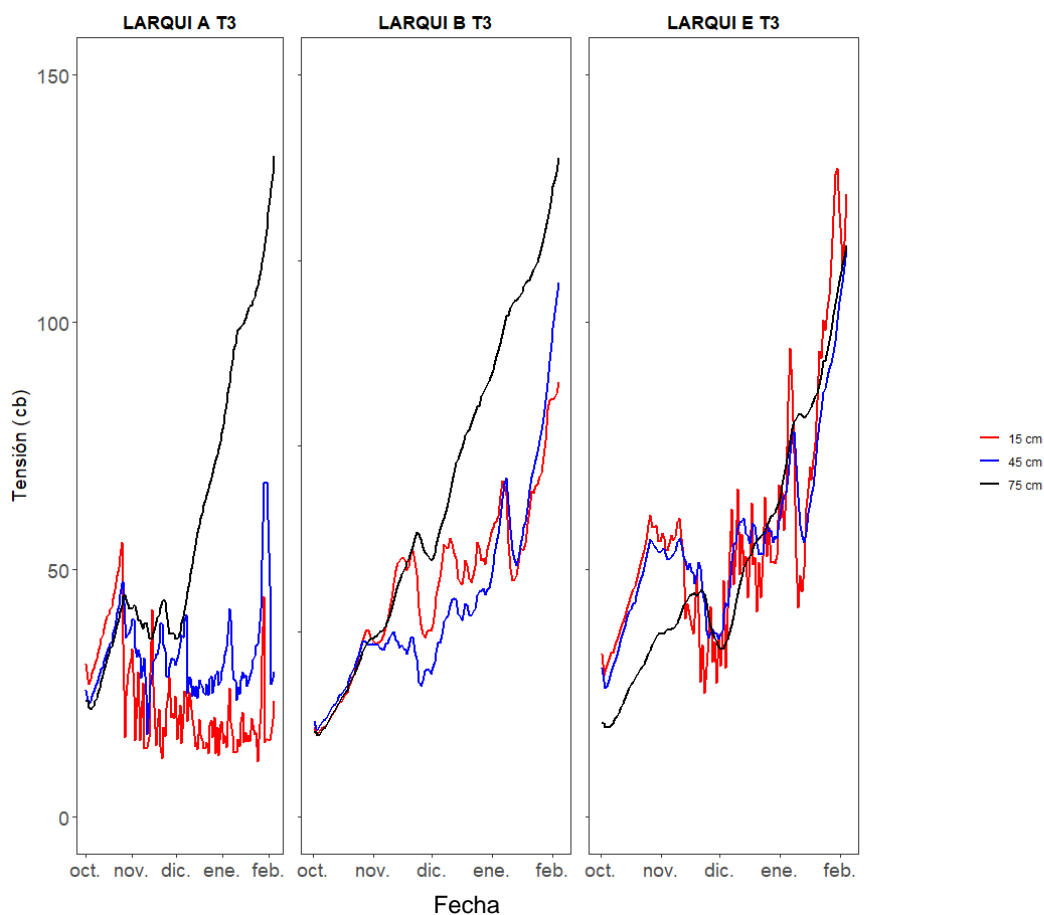


Figura 9. Tensión de agua del suelo para los datos de la tercera temporada de riego (2019-2020) a profundidades de suelo de 15, 45 y 75 cm, representada por el logger A, B y E distanciados a 0, 0,8 y -0,8 m del tronco, respectivamente.

Las mediciones efectuadas bajo el tronco del avellano (Figura 10, Larqui A T3) a 15 cm de profundidad indican que acercándose el mes de noviembre se alcanza un pick de tensión superando mínimamente los 50 cb, luego de esto los valores se mantienen oscilantes, pero siempre bajo los 50 cb. A la profundidad de 45 cm se aprecia que en gran parte de la temporada los valores

permanecen bajo los 50 cb, exceptuando en el mes de febrero de 2020 los valores se elevan hasta los 70 cb aproximadamente, para luego disminuir hasta los 25 cb.

Lo que ocurre a los 75 cm bajo el suelo para el mes de octubre y noviembre de 2019 es un comportamiento creciente al inicio, que luego se mantiene bajo los 50 cb. A partir de diciembre los valores comienzan a aumentar considerablemente a medida que transcurren los días sin presentar alguna disminución, observándose que a final de temporada la medición arroja valores que alcanzan los 130 cb aproximadamente dando a conocer cada vez más la necesidad de agua en el suelo.

El análisis de valores a 80 cm de distancia del tronco (Figura 10, Larqui B T3) arroja para los 15 cm de profundidad valores que comienzan en los 25 cb y que tempranamente en el mes de noviembre logran superar los 50 cb. Durante pocos días de diciembre se observa una disminución hasta los 50 cb, para luego seguir incrementándose hasta final de temporada superando los 100 cb. En el caso de los datos obtenidos a 45 cm bajo tierra, se presenta un comportamiento bajo los 50 cb hasta mediados de diciembre, luego, en el mes de enero se alcanza un pick que se aproxima a los 100 cb, generándose a mediados de este mismo mes una baja en los valores presenciados, pero a finales de enero los datos se elevan hasta casi alcanzar los 150 cb a fin de temporada.

Los datos mostrados para la profundidad de 75 cm superan los 50 cb llegando el mes de noviembre y continúan elevándose con ímpetu hasta lograr superar

los 150 cb a fines del mes de febrero que es donde culmina la medición de dicha temporada.

El análisis de los datos a -0,8 m (Figura 10, Larqui E T3) se realiza primero a los 15 cm de profundidad, en donde se observa que durante el mes de octubre y noviembre ocurre un aumento de los valores sobrepasando los 50 cb y manteniéndose así hasta mediados de noviembre, cuando comienza a disminuir llegando hasta los 25 cb en diciembre. Los valores nuevamente son ascendentes teniendo un pick en enero que es cercano a los 100 cb y casi de inmediato una disminución que alcanza valores inferiores a los 50 cb y para final de temporada los valores nuevamente crecen hasta alcanzar los 130 cb aproximadamente.

El comportamiento a los 45 cm presenta valores que se alcanzan en el pick de enero y son cercanos a los 70 cb, enseguida descienden hasta los 50 cb, y a finales de temporada presenta un aumento hasta alcanzar los 120 cb.

A la profundidad de 75 cm los valores durante los 2 primeros meses de la temporada están bajo los 50 cb y son considerablemente menores a las otras dos curvas, acercándose el mes de diciembre al igual que en los otros dos casos existe una disminución en los datos medidos cercana a los 30 cb. A partir del mes de diciembre se aprecia claramente que existe una falta de agua cada vez más extrema debido a que los datos no dejan de aumentar su valor llegando a superar los 100 cb a finales de temporada.

5.3 Análisis temporal del contenido volumétrico de agua en el suelo

La Figura 11 es un complemento de los análisis realizados en la sección anterior, que indican valores superficiales del contenido de humedad volumétrica del suelo, medidos entre y sobre hilera en el sitio de estudio Larqui Bulnes para dos temporadas de riego (2017-2018 y 2018-2019).

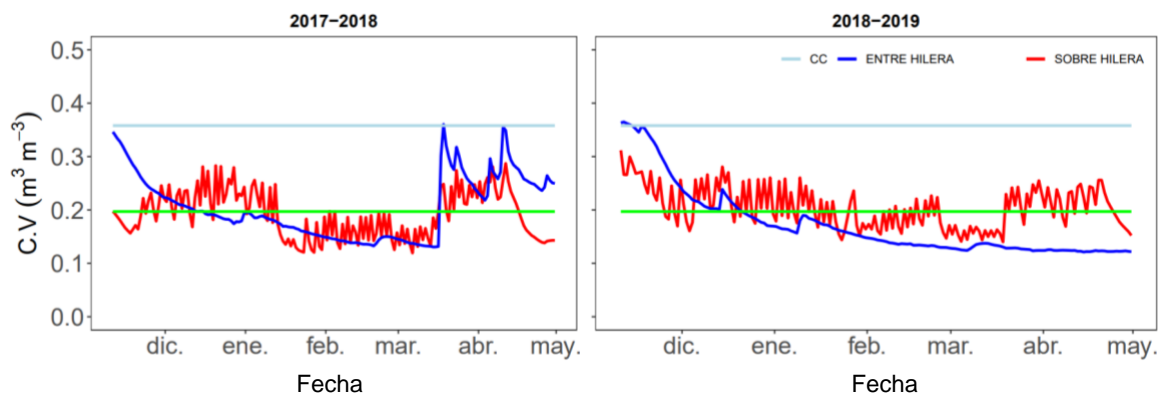


Figura 10. Contenido de humedad volumétrico de suelo (CV) a 5 cm de profundidad de suelo entre y sobre hilera para la temporada de riego 2017-2018 y 2018-2019.

La Figura 11 para la temporada 2017-2018 muestra que el contenido de humedad del suelo entre hilera inicia en $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y a medida que avanza la temporada comienza a disminuir paulatinamente los valores hasta mediados de marzo de 2018 alcanzando $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a partir de esa fecha existe un ascenso repentino e intenso que logra alcanzar aproximadamente los $0,37 \text{ m}^3$

m^{-3} en pocos días debido a una precipitación de 21,6 mm el día 17 de marzo. De ahí en adelante, producto del cambio de estación la variabilidad del contenido de humedad entre hilera se observa variable de acuerdo a la demanda evaporativa del aire y la pluviometría recibida.

A comienzos de la temporada 2017-2018 (Figura 11) el contenido de humedad del suelo sobre hilera varía entre los 0,15 y los 0,3 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ hasta mediados de enero. Luego se presenta una disminución de los datos entre 0.1 y 0,2 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ desde fines de enero a mediados de marzo de 2018, desde esta última fecha los valores ascienden sobrepasando nuevamente los 0,2 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, producto de la precipitación de 21,6 mm, manteniéndose esta situación alrededor de 1 mes y, a fin de temporada se observa una disminución acelerada que se aproxima a los 0.1 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ producto del manejo de riego (no riego).

Para esta temporada ningún valor entre y sobre hilera supera los 0,358 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ de contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo. Además, se observa una relación directa entre la disminución de la humedad en los 5 cm de profundidad de suelo y la evaporación de suelo, donde se destaca que en esa zona la mayor pérdida de agua se produce por evaporación y no por el consumo de agua de la planta (Souto, 2019).

Es posible observar desde la Figura 11 (2018-2019) que los valores entre hilera se mantienen entre los 0,33 y los 0,38 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ en octubre y noviembre, debido a que estos meses aún conservan mayor cantidad de humedad en el suelo, sumado al riego y a las precipitaciones que acumularon 100 mm en

estos 2 meses. A partir de diciembre se aprecia una disminución notoria que alcanza los $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ puesto que disminuye la cantidad de precipitación a partir de diciembre. Luego, se muestra una pequeña alza en la humedad de suelo, pero finalmente el contenido de humedad volumétrico termina descendiendo gradualmente hasta mantenerse cercano a los $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a fines de temporada.

Los valores obtenidos sobre hilera en la temporada 2018-2019 (Figura 11) se mantienen fluctuando entre los $0,17$ y los $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ aproximadamente. Los valores más altos se alcanzan a fines de noviembre con $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y los más bajos a fines de marzo y fines de abril con $1,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, lo que tiene una directa relación con el manejo de riego del huerto.

El contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo y punto de marchitez permanente para el sitio de estudio Larqui es de $0,358 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $0,197 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente para la temporada 2018-2019.

En general, los valores de contenido volumétrico de humedad de suelo sobre y entre hilera para la temporada 2018-2019 permanecen gran parte de la temporada dentro del rango de agua disponible para ser extraída por el avellano.

5.4 Evapotranspiración de cultivo

A continuación, en las Figuras 12 a 15, se muestra la evapotranspiración medida por la estación ET-full para los días de riego analizados, en la sección anterior, en la temporada 2018-2019.

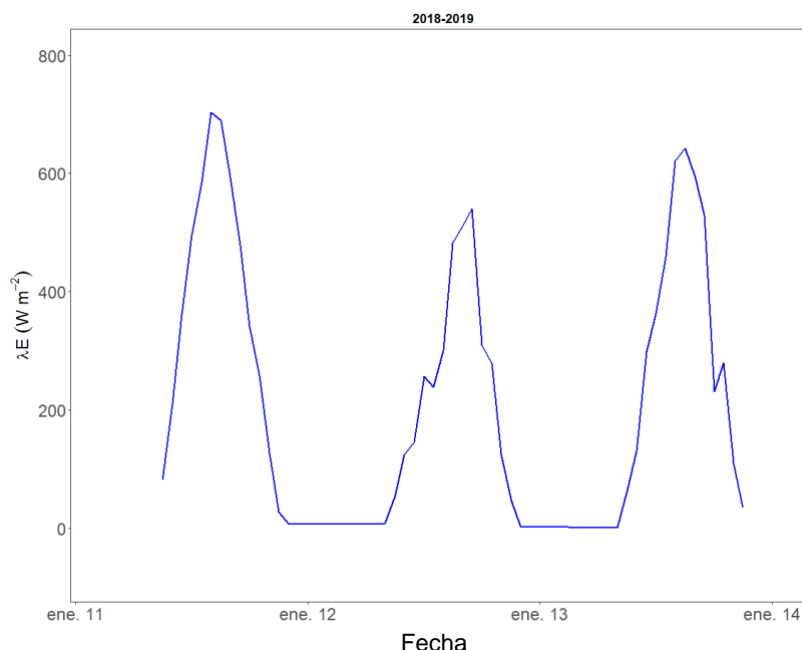


Figura 12. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 11, 12 y 13 de enero de 2019.

El día 11 de enero ocurre el evento de riego y el calor latente llega a su pick a las 14:00 h (medio día solar) alcanzando los 700 W m^{-2} , luego comienza a descender a medida que transcurre el día. El primer día después de riego a las 8:00 h se aprecian valores de ET que van en ascenso a medida que pasan las horas, existe una pequeña disminución de evapotranspiración entre las 12 y 13 horas, pero luego continúa aumentando hasta alcanzar los 540 W m^{-2} a

las 17:00 h, teniendo un pick menor al alcanzado el día del evento de riego. El 13 de enero, segundo día después de riego la ET aumenta con el paso de las horas y alcanza un pick de 640 W m^{-2} a las 15:00 h y de manera normal comienza a disminuir hasta las 18:00 h en donde se aprecia un pequeño aumento en la evapotranspiración, pero que a partir de las 19:00 h desciende nuevamente hasta el final del día.

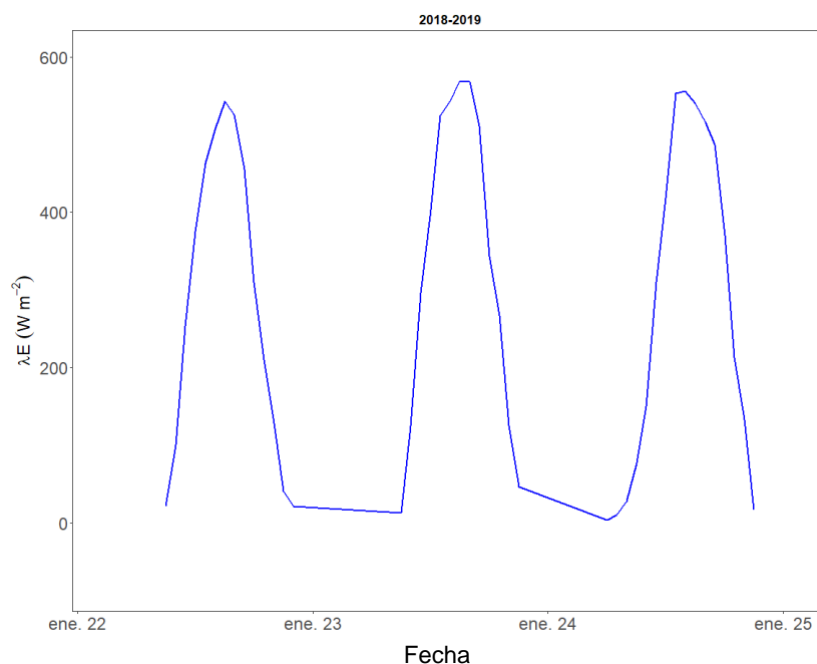


Figura 13. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 22, 23 y 24 de enero de 2019.

En la Figura 13, el evento de riego es el 22 de enero de 2019, alcanzando una evapotranspiración de 542 W m^{-2} a las 15:00 h. El día 23 de enero, un día después de riego la ET comienza a aumentar a las 9:00, alcanzando un pick

de 568 W m^{-2} a las 15:00 h, luego comienza a descender la ET hasta el final del día. Dos días después de riego la ET máxima alcanzada a las 14:00 con un valor de 556 W m^{-2} un tanto menor que la alcanzada el día anterior.

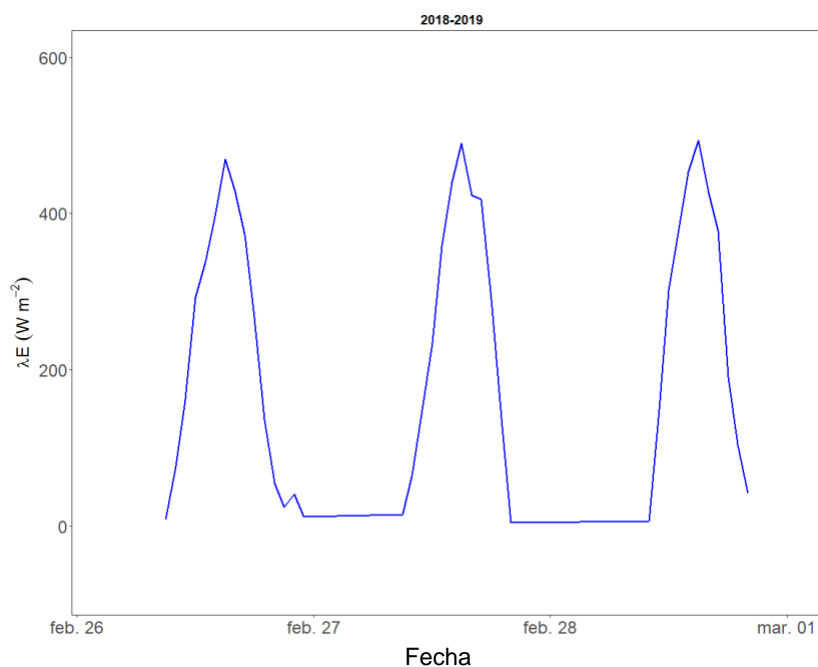


Figura 14. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 26, 27 y 28 de febrero de 2019.

En la Figura 14, el evento de riego es el 26 de febrero de 2019, alcanzando una evapotranspiración de 469 W m^{-2} a las 15:00 h. El día 27 de febrero, un día después de riego la ET comienza a aumentar a las 9:00, alcanzando un pick de 490 W m^{-2} a las 15:00 h, luego comienza a descender la ET hasta el final del día. Dos días después de riego la ET máxima alcanzada a las 15:00 h fue de 493 W m^{-2} .

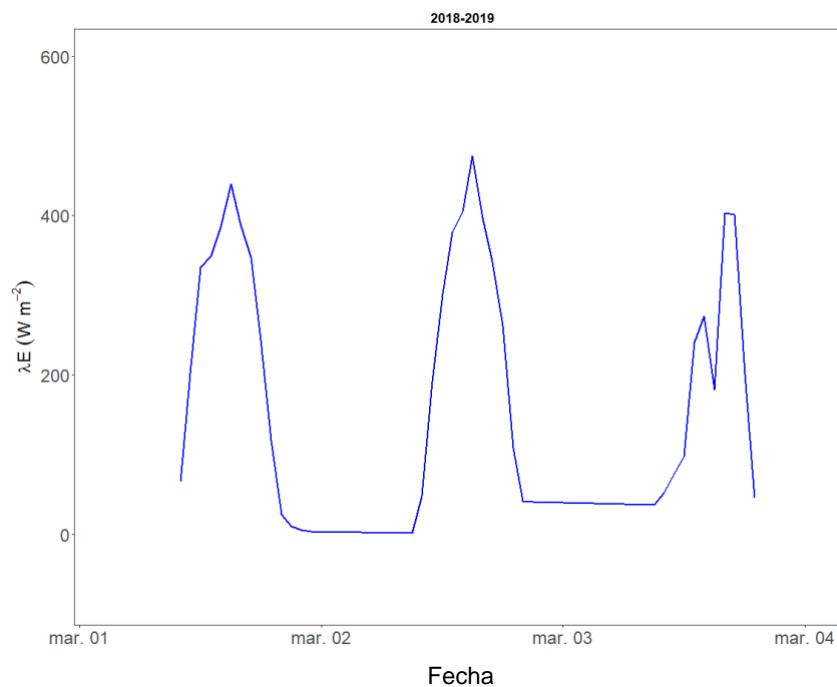


Figura 15. Flujo de calor latente medido por la estación para los días 1, 2 y 3 de marzo de 2019.

Para el día 1 de marzo, día del evento de riego, como se observa en la Figura 15, la ET máxima alcanzada es de 439 W m^{-2} a las 15:00 h, y al final del día se aprecia una notoria disminución debido a que la R_n , principal motor en la evapotranspiración, disminuyó con el transcurso de las horas. Un día después de riego se obtuvo una ET máxima de 474 W m^{-2} a las 15:00 h, observándose en la Figura 15 como a medida que avanza la tarde la ET va decreciendo. El día 3 de marzo de 2019, dos días después de riego, la evapotranspiración aumenta de manera más paulatina comenzando un ascenso más pronunciado cerca de las 15:00 h y el pick alcanzado ese día es de 402 W m^{-2} .

De las Figuras 12, 13, 14 y 15 se pueden inferir que la ET a medida que pasan los días después de riego comienza a disminuir levemente en avellano europeo regado por goteo. Sin embargo, en este sistema de riego por goteo se utiliza una frecuencia de riego entre 2 a 3 días, haciendo que la ET se mantenga elevada debido al gran aporte de evaporación que se está produciendo después de cada evento de riego (Souto, 2019).

5.5 Análisis de la Evapotranspiración producida luego de un evento de riego.

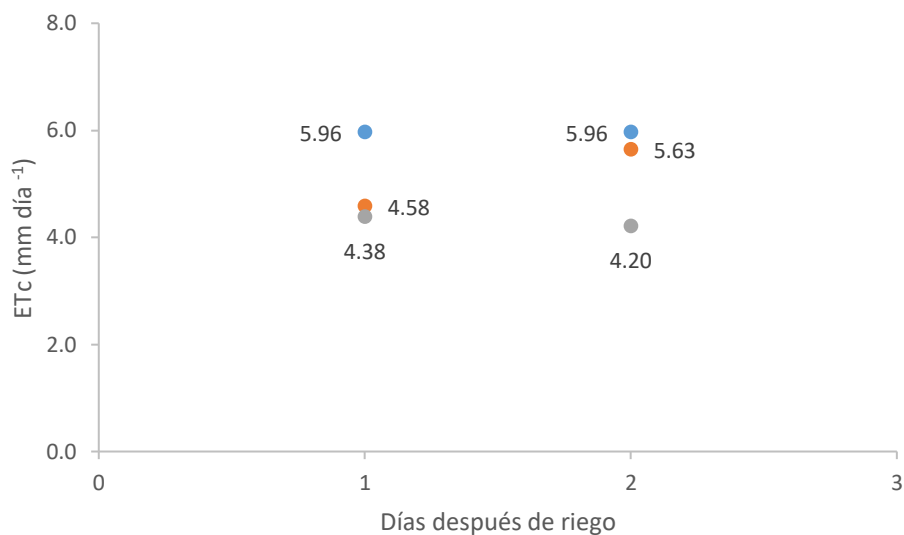


Figura 16. Evapotranspiración de cultivo (ETc) evaluada en 3 eventos, para 1 y 2 días después de riego.

En la Figura 16 se aprecia que los puntos de diferente coloración señalan los eventos de riego (se consideraron 3), también se observa que en promedio 1 día después de riego para los eventos evaluados el cultivo evapotranspiró 5 mm día⁻¹, mientras que para 2 días después de riego el cultivo tiene una ET de 5,3 mm día⁻¹.

Aplicando un modelo estadístico, como es la desviación estándar (DS), se obtuvo que para el primer día después de riego la DS es de 0,7 y para el segundo día después de riego es de 0,77. Esto quiere decir que siendo baja la DS la distribución de los datos no está tan dispersa, éstos están agrupados cerca del promedio obteniéndose el valor esperado.

5.6 Análisis de la evapotranspiración temporal del avellano europeo

Se realiza un análisis de temporada de evapotranspiración para los años 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020 que se presentan a continuación.

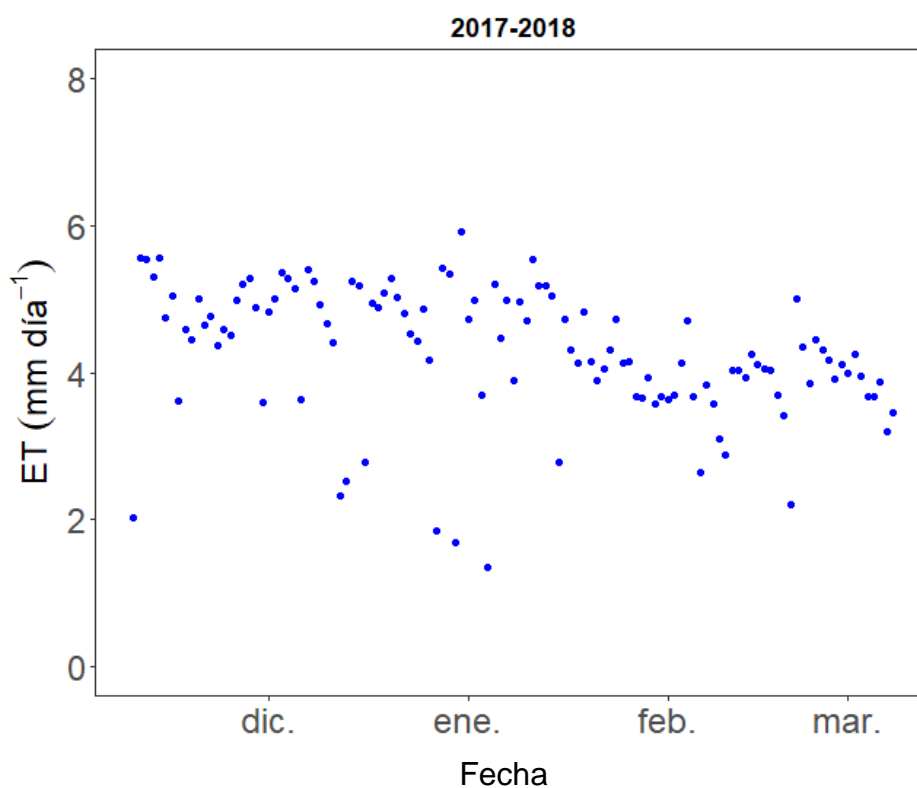


Figura 17. Evapotranspiración medida por la estación durante la temporada 1 (2017-2018).

Las mediciones de evapotranspiración en esta temporada comienzan a partir del 10 de noviembre como se observa en la Figura 17, con un valor de 2 mm día⁻¹, luego este valor aumenta considerablemente el día siguiente hasta alcanzar los 5 mm día⁻¹. Se observa una oscilación entre 3,0 y 5,5 mm día⁻¹

hasta la quincena de diciembre, a partir de esta fecha existe una disminución de la evapotranspiración cercana a los 2 mm día⁻¹. El día 31 de diciembre se presenta la evapotranspiración más alta alcanzando los 5,9 mm día⁻¹ y contrariamente el día 4 de enero es donde se aprecia la evapotranspiración más baja de la temporada con un valor de 1,35 mm día⁻¹. El resto de la temporada los valores de evapotranspiración varían entre los 2,5 y 5,5 mm día⁻¹.

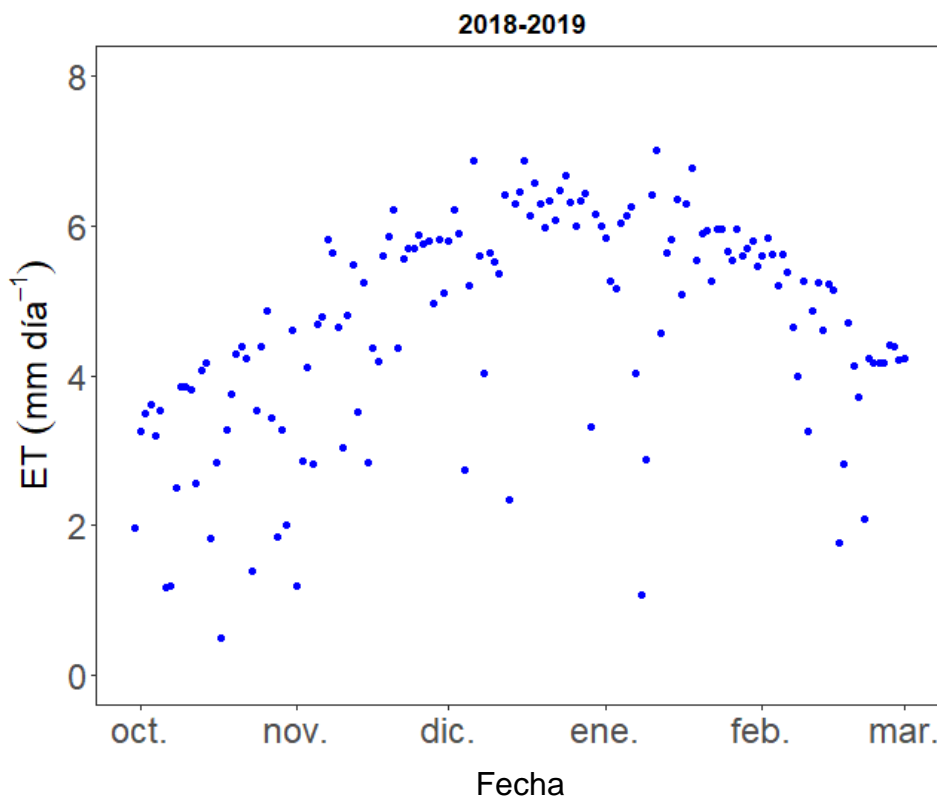


Figura 18. Evapotranspiración medida por la estación durante la temporada 2 (2018-2019).

La Figura 18 muestra los datos obtenidos por la estación para la temporada 2 (2018-2019), en donde la evapotranspiración comienza bordeando los 2 mm

día⁻¹, luego se observa como oscila continuamente. El día 17 de octubre de 2018 la evapotranspiración medida es de 0,5 mm día⁻¹ siendo la más baja de la temporada debido a una lluvia cercana a los 30 mm. En cierta medida se aprecia como los valores van aumentando a medida que se acerca el verano (sin olvidar que existen valores que decaen en ciertos días probablemente por precipitaciones), el día 11 de enero se presenta el valor más alto de evapotranspiración con 7 mm día⁻¹. Luego de la evapotranspiración más alta alcanzada, ésta comienza a descender hasta que a fines de temporada nos encontramos con valores cercanos a los 4 mm día⁻¹.

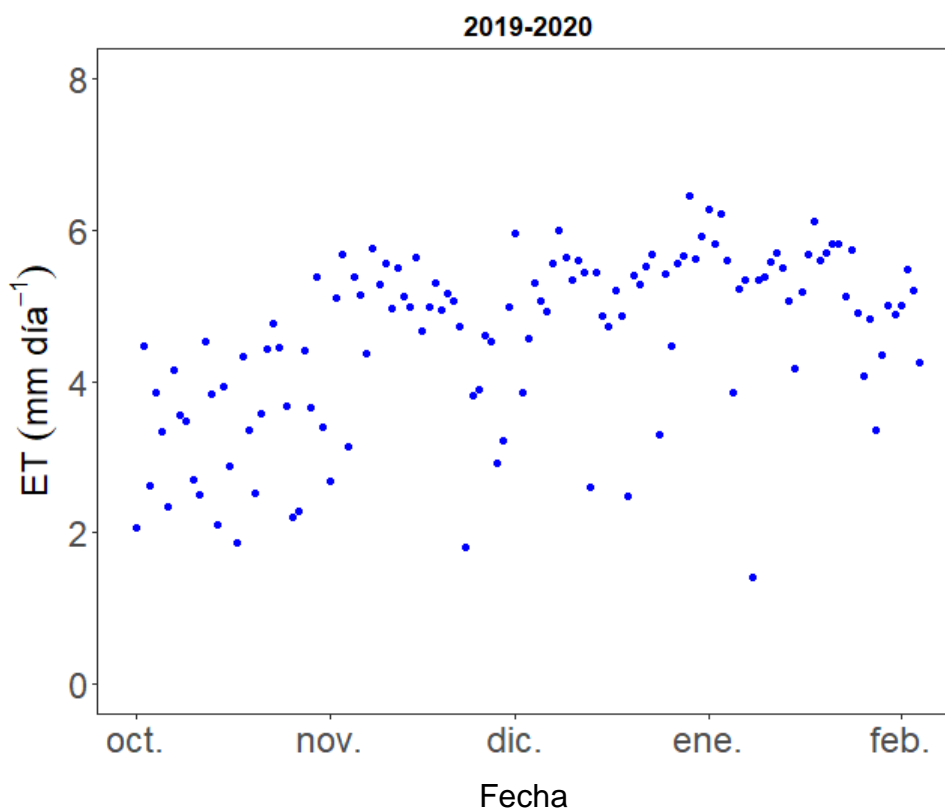


Figura 19. Evapotranspiración medida por la estación durante la temporada 3 (2019-2020).

La evapotranspiración a inicios de temporada bordea los 2 mm día⁻¹, se mantiene durante el mes de octubre variando entre 2 y 5 mm día⁻¹, en la Figura 19 se observa que existe un valor bajo finalizando el mes de noviembre de 1,8 mm día⁻¹ producto de una precipitación.

El día 29 de diciembre de 2019 se registra el valor de evapotranspiración más alto, alcanzando los 6,5 mm día⁻¹ y el valor más pequeño de evapotranspiración de la temporada ocurre el día 8 de enero con 1,4 mm día⁻¹. Finalizando la temporada 2019-2020 los valores varían entre los 3 y 6 mm día⁻¹.

Adicionalmente, se observó un consumo de agua promedio para el mes de noviembre de 4,7 mm día⁻¹, mientras que para el mes de máxima demanda es de 5,5 mm día⁻¹ en las temporadas analizadas.

5.7 Interacción de la extracción de agua desde el suelo y evapotranspiración

La evapotranspiración en el suelo estudiado se comportó de manera normal, debido a que en el mes de enero se presentaron los valores más altos alcanzando los 700 W m⁻² y a medida que se acercó el mes de marzo dichos valores disminuyeron. Al evaluar lo que sucedió con la evapotranspiración después de cada evento de riego se encontró que ocurrieron variaciones, tanto un aumento como disminución en la cantidad de evapotranspiración uno o dos días después de riego. En el primer evento de riego analizado el día 11 de

enero de 2019, se presentó el porcentaje más alto de variación un día después de riego, la evapotranspiración disminuyó en un 23% y luego el día posterior sólo disminuyó un 8,6% en comparación al día regado, lo que indica que comienza a aumentar nuevamente la evapotranspiración.

Todos los eventos analizados se comportaron de manera diferente, puesto que en el segundo evento de riego (22 de enero de 2019) la evapotranspiración aumentó en un 4,8% un día después de riego y dos días después de riego la cantidad de agua evapotranspirada disminuyó, aumentando solo un 2,6 % en comparación al día del evento.

El 26 de febrero ocurrió el tercer evento de riego, en donde se encontró que la evapotranspiración aumentó en un 4,5% y un 5,1%, uno y dos días después de riego respectivamente.

La evapotranspiración medida en el último evento de riego analizado (01 marzo de 2019) es la más baja con 439 W m^{-2} el día de riego, el porcentaje de variación de la evapotranspiración aumentó en un 8% un día después de riego y disminuyó en un 8,4% para el segundo día, en comparación al 01 de marzo.

5.8 Análisis de la tensión del suelo y evapotranspiración durante los eventos de riego y los días posteriores

Al realizar un análisis entorno a la cantidad de evapotranspiración y de tensión que presenta el suelo durante los eventos de riego monitoreados, se puede rescatar que existe una coherencia en las variaciones existentes.

En el primer evento de riego es posible observar que la tensión en el suelo un día después de riego es menor a la que se presenta dos días después de riego, queriendo decir que existe mayor cantidad de agua en el suelo en el primer día, por esto mismo la evapotranspiración es menor el primer día después de riego y luego aumenta generando que el suelo pierda agua y la tensión sea mayor.

Lo que ocurre en el segundo evento de riego es que un día después, la evapotranspiración es mayor y se observa que la tensión en el suelo es menor expandiéndose horizontalmente el área humedecida. Los comportamientos en cuanto a la tensión presentada no varían mucho entre uno o dos días después de riego, y la evapotranspiración generada el segundo día después del evento aumenta en un 3% en comparación al día de riego.

La variación de valores para la evapotranspiración durante el mes de febrero aumenta a medida que pasan los días después del riego, ocurre que la tensión va aumentando en esos días, lo que implica que el agua en el suelo va disminuyendo producido por la evapotranspiración.

Comenzando el mes de marzo de 2019, en donde ocurre el último evento de riego analizado, la evapotranspiración aumenta un día después de riego debido a la existencia de mayor cantidad de bulbo húmedo y luego el segundo día comienza a disminuir. Lo que ocurre con la tensión solo se puede analizar un día después de riego debido a que no se tienen datos dos días después, pero lo que ocurre es que la tensión comienza a aumentar lo que quiere decir que el agua está siendo extraída como bien se observa en el aumento de la evapotranspiración.

6. CONCLUSIÓN

Se analizaron los patrones de humedad y el consumo de agua diario y temporal del avellano europeo con sistemas de riego por goteo en el predio Larqui Bulnes, en donde se pudo observar la implicancia que tiene en el consumo de agua diario y temporal del frutal, dependiendo de las condiciones climáticas a las que se expone durante los meses de riego.

Se realizó la interpretación de los datos entregados por los sensores ubicados bajo el suelo del avellano europeo, analizando el patrón de humedecimiento de suelo con sistema de riego por goteo con 8 goteros por árbol de $3,8 \text{ L h}^{-1}$ cada uno. En general, se encontraron áreas de humedecimiento similares para los días analizados en la temporada 2018-2019, se observó que la mayor humedad se encuentra bajo el tronco y se expande hacia los extremos dentro de los primeros 40 cm de profundidad, donde la humedad se encuentra cercana a la profundidad esperada de las raíces (50-60 cm) lo que genera una buena reacción debido a que todo el bulbo húmedo cubriría el espacio radicular donde el avellano debe extraer el agua que necesita, e incluso pudiese sobrepasar esta profundidad.

Se determinó la evapotranspiración de cultivo del avellano europeo bajo riego por goteo con dos laterales y 8 goteros por árbol. Analizando los días de riego específicos y a lo largo de la temporada de riego, teniendo así un comportamiento de la ET que comienza con valores cercanos a los 4 mm día^{-1} en el mes de octubre y alcanza valores entre $6 \text{ y } 7 \text{ mm día}^{-1}$ en el mes de

enero. Alcanzando valores de ET de 4 mm día⁻¹ antes de cosecha. Durante el transcurso de los meses de riego existen disminuciones notorias en la evapotranspiración producidas por eventos climáticos, principalmente por las precipitaciones. Existen otras condiciones de variación dependiendo la época como el área foliar del frutal debido a que gran parte del agua extraída (80-85%) se genera por la transpiración de las hojas, dependiendo del manejo de riego.

Finalmente, se evaluó la relación que se produce entre el área humedecida y la ET de cultivo en avellano europeo con sistema de riego por goteo. Se recomienda continuar explorando patrones de extracción de agua de frutales debido a que son un factor muy importante en la relación rendimiento agua consumida por el frutal. Finalmente, el monitoreo de la humedad del suelo más allá de los 75 cm de profundidad para el caso de los avellanos europeos deja de ser relevante puesto que su profundidad radicular y la extracción de agua bajo el tronco es mayoritariamente sobre los 60 cm de profundidad, más abajo se aprecia que la humedad se mantiene a medida que transcurren los días después de riego.

7. LITERATURA CITADA

1. Allen, R.G., I.A. Walter, R.L. Elliott, T.A. Howell, D. Itenfisu, M.E. Jensen and R.L. Snyder. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. American Society of Civil Engineers. Reston, USA.
2. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N°56. FAO. Roma, Italia.
3. Banco Mundial. 2008. El agua en la agricultura [en línea]. Banco Mundial, USA. <<https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#2>>. [Consulta: 26 agosto 2020].
4. Ellena, M., P. Sandoval, A. González, A. Montenegro, G. Azócar y L. Medina. 2013. Avellano europeo: Establecimiento y formación de la estructura productiva. Boletín INIA N°274. INIA Carillanca. Vilcún, Chile.
5. Engber, E. 2021. Estrategia para un riego productivo en avellano europeo [en línea]. Mundo Agro, Chile. <<https://www.mundoagro.cl/estrategias-para-un-riego-productivo-en-avellano-europeo/>>. [Consulta: 30 agosto 2021].
6. Jara, J., A. Valenzuela. 1998. Necesidades de agua de los cultivos. CNR. UdeC. Chillán, Chile.
7. Lecaros, F.A. 2018. Efecto del área de humedecimiento con diferente número de laterales por hilera bajo riego por goteo en la producción de manzanos. Tesis, Magister en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos. Universidad de Concepción. Dirección de Postgrado. Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
8. López-Olivari, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile: Conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Boletín INIA N°340. INIA Carillanca. Vilcún, Chile.

9. ODEPA (Chile). 2017. Panorama de la agricultura chilena [en línea]. ODEPA, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/panoramaFinal20102017Web.pdf>>. [Consulta: 18 agosto 2020].
10. Santibáñez, F., P. Santibáñez, C. Caroca y P. González. 2017. Atlas agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones del Biobío y La Araucanía. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
11. Souto, C.I. 2019. Transpiración de cultivo y evaporación de suelo para cultivos de cobertura parcial y suelos parcialmente humedecidos. Tesis, Doctor en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos en la Agricultura. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.