

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



COMPARACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA REAL Y ESTIMADA DE
AVELLANOS EUROPEOS MEDIANTE SENSORES REMOTOS

OSCAR GONZALO VIVEROS PINO

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

CHILLÁN-CHILE

2022

**COMPARACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA REAL Y POTENCIAL DE
AVELLANOS EUROPEOS MEDIANTE SENSORES REMOTOS**

Aprobado por:

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Guía

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

Profesor Guía

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

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniera Civil Agrícola, Ph.D.
Profesor asistente

Director de Departamento

María Eugenia Gonzales Rodríguez
Ingeniera agrónoma, Ph.D.
Profesor asociado

Decana

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mi familia por el apoyo durante este ciclo, en especial a mis padres. A mis Profesores Guías Dr. Camilo Souto y el Dr. Eduardo Holzapfel por la buena disposición al momento de resolver mis dudas, a los profesores y funcionarios en general de la facultad por contribuir en la formación.

A los amigos que hice en la “facu” por hacer la vida universitaria agradable.

Al centro de recursos hídricos para la agricultura y la minería – CRHIAM, proyecto ANID/FONDAP/15130015.

ÍNDICE DE MATERIAS

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN | 9 |
| SUMARY | 11 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 14 |
| 2.1. Objetivo general | 14 |
| 2.2. Objetivos específicos | 14 |
| 3. ANTECEDENTES GENERALES | 15 |
| 3.1. Sitios de evaluación | 15 |
| 4. METODOLOGÍA | 16 |
| 3.2. Evapotranspiración mediante Google Earth Engine..... | 16 |
| 3.3. Estación meteorológica | 16 |
| 3.4. Estación de referencia..... | 17 |
| 3.5. Factor de cobertura (<i>CF</i>) | 19 |
| 3.6. Factor de cultivo (<i>F_c</i>)..... | 20 |
| 3.7. Factor de riego (<i>IF</i>)..... | 20 |
| 3.8. Suministro relativo de agua (<i>RWS</i>) | 21 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSION | 23 |
| 4.1. Factor de Cobertura..... | 23 |
| 4.2. Evapotranspiración determinada con Google Earth Engine | 28 |
| 4.3. Comparación entre ET_c medida, estimada y satelital | 34 |
| 4.4. Evaluación del programa de riego | 39 |
| 4.5. Recomendaciones | 41 |
| 5. CONCLUSIÓN | 43 |
| 6. LITERATURA CITADA | 45 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 1. Ubicación y altitud de la estación de referencia..... | 16 |
| Tabla 2. Factores de cobertura obtenidos durante cuatro temporadas de riego..... | 22 |
| Tabla 3. Índices RMSE y RD de la calibración del factor de cobertura (Fc), para las temporadas analizadas.. | 25 |
| Tabla 4. Error cuadrático medio (RMSE) y diferencias relativas (RD), para las variables estimadas con imágenes satelitales..... | 30 |
| Tabla 5. Error cuadrático medio (RMSE) y diferencias relativas (RD), para la evapotranspiración medida con satélite ($ET_{c_{sat}}$). | 31 |
| Tabla 6. Raíz del error cuadrático medio (RMSE) y diferencias relativas (RD), para Evapotranspiración calculada por análisis satelital a lo largo de cada temporada | 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.. | 14 |
| Figura 2. Comparación de la demanda estimada y la demanda medida 2017-2018, 2018-2019 y 2020-2021.. | 24 |
| Figura 3. Comparación de la demanda estimada y la demanda medida 2017-2018..... | 26 |
| Figura 4. Comparación de la demanda estimada y la demanda medida 2018-2019..... | 26 |
| Figura 5. Comparación de la demanda estimada y la demanda medida 2018-2019..... | 27 |
| Figura 6. Radiación neta medida con estación EC (RN _{measured}) y estimado con imágenes satelitales (RN _{estimated})..... | 25 |
| Figura 7. Flujo de calor sensible medido con estación EC (H _{measured}) y estimado con imágenes satelitales (H _{estimated})..... | 28 |
| Figura 8. Densidad de Flujo de calor en el suelo medido con estación EC (G _{measured}) y estimado con imágenes satelitales (G _{estimated}) analizadas | 28 |
| Figura 9. Evapotranspiración de cultivo medida (ET _{c_{med}}) y satelital (ET _{c_{sat}}), para las tres temporadas analizadas | 30 |
| Figura 10. Evapotranspiración medida (ET _{c med}), estimada (ET _{c est}), y de satélite (ET _{c sat}), para las temporadas A)2017-2018, B)2018-2019 y C)2020-2021..... | 32 |
| Figura 11. Evapotranspiración acumulada estimada, satélite y medida, para temporadas A)2017-2018, B)2018-2019 y C)2020-2021... | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 12. Mapa de evapotranspiración medida por satélite ($ET_{C_{sat}}$) para las temporadas 2017-2018 y 2018-2019..... | 36 |
| Figura 13. Mapa de evapotranspiración medida por satélite (ET_{csat}) para la temporada 2020-2021..... | 37 |
| Figura 14. Factor de riego (FR), factor de cultivo obtenido mediante imágenes satelitales (CF sat), factor de cobertura estimado (FC est) para la temporada 2020-2021..... | 38 |
| Figura 15. Suministro relativo de agua (RSW)..... | 39 |
| Figura 16. Volúmenes de agua aplicada, evapotranspirada y potencial durante la temporada 2020-2021..... | 40 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | Página |
|---|--------|
| Ecuación 1. ET medida ($ET_{c_{med}}$) de los avellanos..... | 17 |
| Ecuación 2. Evapotranspiración de referencia Penman Monteith .. | 18 |
| Ecuación 3. Evapotranspiración estimada | 19 |
| Ecuación 4 . Factor de cobertura estimado | 19 |
| Ecuación 5. Porcentaje de cobertura | 19 |
| Ecuación 6. Factor de Cultivo.. | 20 |
| Ecuación 7 . Factor de riego | 21 |
| Ecuación 8. Suministro relativo de agua | 21 |
| Ecuación 9. Raíz del error cuadrático medio..... | 22 |
| Ecuación 10 . Diferencias relativas | 22 |

COMPARACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA REAL Y ESTIMADA DE AVELLANOS EUROPEOS MEDIANTE SENSORES REMOTOS

COMPARISON OF ACTUAL AND ESTIMATED WATER DEMAND FOR EUROPEAN HAZELNUTS USING REMOTE SENSING

Palabras claves: Avellano europeo, demanda hídrica, Landsat 8, microriego.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue comparar la demanda hídrica del avellano europeo, en el sitio de estudio "Pullamí, de forma más concreta se estimó mediante un análisis estadístico los factores de cobertura, se comparó la demanda real obtenida mediante una estación Eddy Covariance, la estimada con factor de cobertura, la obtenida mediante la aplicación del modelo SEV-PV a imágenes satelitales y finalmente con el agua aplicada según el plan de riego programado por el agricultor. La aplicación de la metodología permitió establecer valores estimados de los factores de cobertura $F_1=1.0$ y $F_2=0.25$ tomando como tres temporadas de riego y las condiciones de manejo del huerto. Al realizar la comparación se determinó que la aplicación del modelo SEV-PV mediante imágenes satelitales otorga buenos resultados de manera puntual (día en que se captó la imagen). Comparando la demanda obtenida con el factor de cobertura, con imágenes satelitales y el agua aplicada se determinó que la programación del riego planificada por el agricultor no es la

adecuada, debido a que no repuso el agua demandada por el cultivo de manera oportuna.

COMPARISON OF ACTUAL AND ESTIMATED WATER DEMAND FOR EUROPEAN HAZELNUTS USING REMOTE SENSING

Keywords: European hazelnut, water demand, Landsat 8, micro-irrigation.

SUMMARY

The objective of this work was to compare the water demand of the European hazelnut, in the study site "Pullamí, more specifically the coverage factors were estimated through a statistical analysis, the real demand obtained by means of an Eddy Covariance station was compared, the estimated with coverage factor, that obtained by applying the SEV-PV model to satellite images and finally with the water applied according to the irrigation plan programmed by the farmer. The application of the methodology allowed to establish estimated values of the coverage factors $F1 = 1.0$ and $F2 = 0.25$, taking as three irrigation seasons and the orchard management conditions. When making the comparison, it was determined that the application of the SEV-PV model through satellite images gives good results in a timely manner (day the image was captured). Comparing the demand obtained with the coverage factor, with satellite images and the applied water, it was determined that the irrigation schedule planned by the farmer is not adequate, because he did not replace the water demanded by the crop in a timely manner.

1. INTRODUCCIÓN

El sector agrícola no solo se encuentra bajo presión de aumentar la producción de alimentos en consonancia con la creciente demanda, sino también de hacerlo de manera sostenible (FAO, 2020).

En cuanto al actual escenario mundial Shaftel, (2021) ya hay efectos que se pueden observar en el medio ambiente. Los glaciares se han encogido, el hielo en los ríos y lagos se está derritiendo antes de tiempo, los hábitats de plantas y animales han cambiado y los árboles florecen antes y olas de calor son más intensas.

Chile ha sido fuertemente afectado por el cambio climático y la mega sequía, por ende, se hace imperativo el uso eficiente y eficaz de los recursos hídricos asociados a la agricultura, esto es fundamental para minimizar el impacto en la disponibilidad de agua, como afirman los autores Holzapfel *et al.* (2020) el manejo del riego debe focalizarse en la implementación de prácticas que permitan un uso adecuado del agua, de manera tal que otros sectores como la minería y el consumo humano, tengan mayor disponibilidad para su desarrollo. Para alcanzar dichas prácticas se hace necesario integrar el uso de tecnología al manejo del riego, entre las más relevantes destacan GPS, imágenes satelitales, que en la revolución verde han representado una disrupción en la agricultura no vista desde la introducción del primer tractor.

Dentro las tecnologías asociadas a la agricultura destacan las imágenes satelitales, las que son de gran apoyo para determinar la demanda y se basan

en balances de energía. Entre los métodos más empleados para estimar la evapotranspiración actual usando imágenes de satélite y la ecuación residual del balance de energía está el método SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), (Bastiaanssen et al. 1998). Como concluyeron Bastiaanssen et al. (2005). SEBAL ha pasado pruebas exhaustivas en una variedad de climas y ecosistemas durante los últimos 10 años lo que implica que se puede aplicar e implementar para resolver problemas de riego y recursos hídricos. Otro modelo usualmente utilizado para determinar las necesidades hídricas de los cultivos es el método METRIC (Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration), el cual basa sus fundamentos y técnicas en el importante modelo SEBAL, con la diferencia que METRIC utiliza la calibración interna del balance de energía basado en satélites en dos condiciones extremas, seco y húmedo, utilizando datos meteorológicos disponibles localmente. (ALLEN, 2007).

En el caso del modelo utilizado en este trabajo SEB-PV, según los autores Lagos et. al (2012) el modelo SEB fue modificado para modelar la evapotranspiración de superficies parcialmente vegetadas y se utiliza para particiones de la ET total en la transpiración de la canopia y la evaporación del suelo debajo de la canopia y el suelo directamente expuesto a la radiación neta. Como afirman estos mismos autores el modelo se necesita mayores evaluaciones a este modelo, por lo que lógicamente lleva a la pregunta si son aplicables las imágenes satelitales y el modelo SEB-PV a un huerto de avellanos y si sirve de apoyo a la toma de decisiones.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar las necesidades hídricas del avellano europeo (*Corylus avellana* L.) regado con microaspersión mediante sensores remotos.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la evapotranspiración del avellano europeo, a través del uso de estaciones Eddy Covariance in situ.
- Calibrar los factores de cobertura, considerando las condiciones de manejo del huerto.
- Realizar un balance hídrico y determinar la demanda de agua durante cuatro temporadas de riego (2017-2018, 2018-2019, 2019-2020).
- Analizar el suministro relativo de agua, durante cuatro temporadas de riego, con el fin de evaluar el desempeño del programa de riego.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Sitios de evaluación

El sitio de estudio está ubicado en la región de Ñuble (Figura 1), en las cercanías de Coihueco sector de Pullami, con datos aportados por (Souto,2019). el área de evaluación es de 6.29 ha de avellano europeo, los cuales actualmente son regados por microaspersión, de caudal nominal de 30 L·h⁻¹

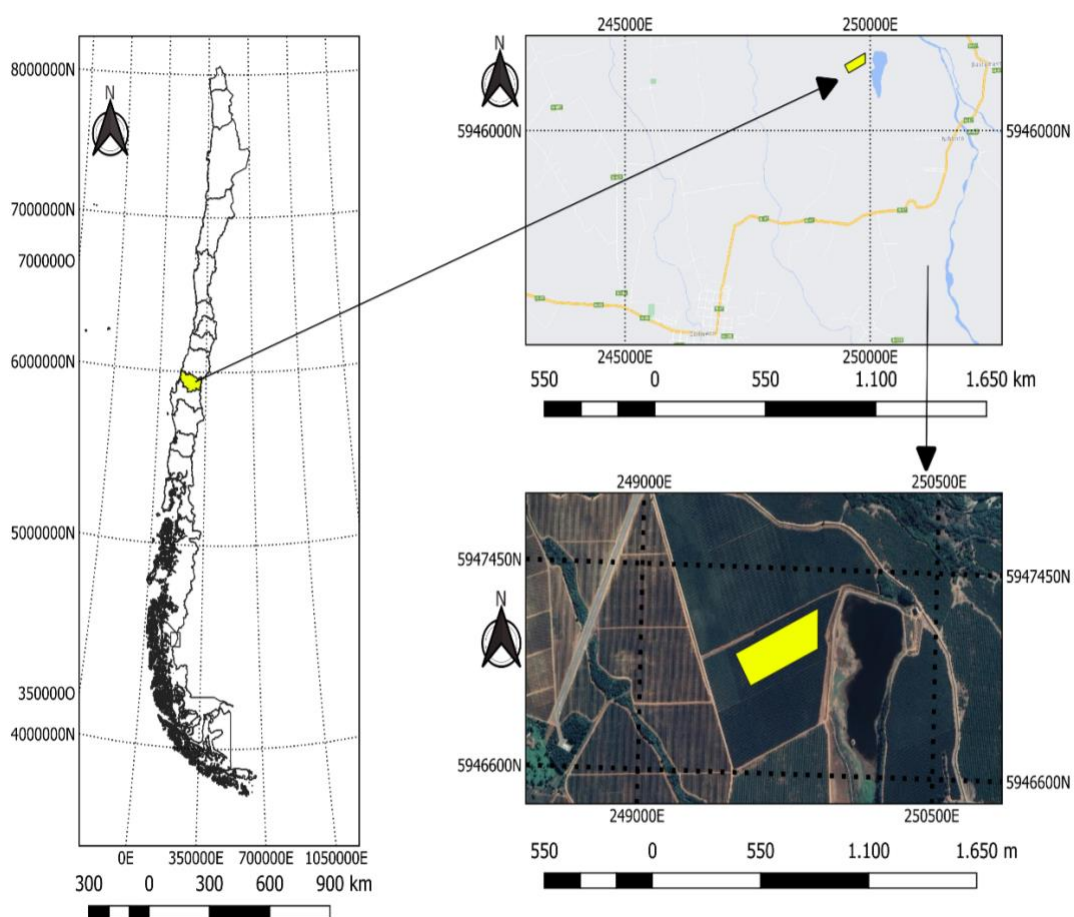


Figura 1. Ubicación geográfica (Datum WGS84, huso19) que corresponde al sitio de evaluación que corresponde a un sector del huerto Pullamí.
Fuente: Elaboración propia

4. METODOLOGÍA

4.1 Evapotranspiración mediante Google Earth Engine

Para obtener la evapotranspiración mediante imágenes satelitales ($ET_{c_{sat}}$), se utilizará la plataforma digital Google Earth Engine para realizar el análisis, apoyándose en el código desarrollado por (Cigarra, 2020), en el que aplica el modelo de balance de energía superficial SEB-PV Lagos et. al (2012). Este recurso permitirá analizar las imágenes satelitales del Landsat 8 disponibles en el predio de Pullami, durante las temporadas de riego del 2017 al 2021, determinando así las necesidades de riego de los avellanos.

4.2 Estación meteorológica

En el sitio de estudio se instaló una estación Eddy Covariance (EC) que consiste de un anemómetro sónico (Ultrasonic anemometer 81000, R.M. Young Company, Traverse City, Michigan, USA) montados a 4,5 m de altura; dos platos de flujo de calor en el suelo sobre hilera y dos entre hilera (Huxseflux HFP01SC, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) a una profundidad de 0,1 m; termocuplas para la medición de temperatura de suelo (TCAV, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) a una profundidad de 0,04 y 0,06 m; un radiómetro neto (NR-Lite2, Kipp & Zonen, Delft, NLD) a 1,5 m de altura sobre la canopia. Con la estación EC se miden las distintas variables biofísicas para obtener la evapotranspiración de los avellanos europeos, que se utilizan como referencia y permitirán comparar los valores de ET obtenidos a través de las

imágenes satelitales. Para obtener la ET medida ($ET_{C_{med}}$) de los avellanos, se empleará la Ecuación 1.

$$ET_{C_{med}} = \frac{R_N - G - H}{\lambda} \quad [1]$$

Donde:

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

G = densidad de flujo de calor latente en el suelo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

H = flujo de calor sensible del aire ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

λ = calor latente de vaporización ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)

4.3 Estación de referencia

La estación de referencia Coihueco se encuentra a una distancia aproximada de 3 km del sitio de estudio (Tabla 1) perteneciente a la red agrometeorológica “Agromet” (www.agromet.cl) y es propiedad de la Fundación para el desarrollo frutícola, la que se utiliza para modelar la evapotranspiración de referencia (ET_r).

Tabla 1. Ubicación y altitud de la estación de referencia.

| Estación | Ubicación (lat, long) (°) | Altitud (m s.n.m.) |
|----------|------------------------------|-----------------------|
| Coihueco | (-36.588362°, -71.798194°) | 228 |

Fuente: www.agromet.cl

Para obtener la evapotranspiración de referencia (ET_r), con los datos de la estación de la red Agromet, se utilizó la ecuación de Penman Monteith:

$$ET_r = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad [2]$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

Δ = pendiente de la curva de saturación presión-vapor ($\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$)

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

G = densidad de flujo de calor latente en el suelo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$)

T_a = temperatura horaria del aire, medida a 2 m (°C)

C_n = constante del numerador, cambia con el intervalo de tiempo de medición

u_2 = velocidad horaria de viento medida 2m ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

e_s = presión de saturación de vapor de agua (kPa)

e_a = presión actual de vapor de agua (kPa)

C_d = constante del denominador, cambia con el intervalo de tiempo de medición.

4.4 Estación Factor de cobertura (CF)

Con la ET_r y $ET_{c_{est}}$ se calibran los factores de cobertura (CF) para el avellano europeo mediante la Ecuación 3.

$$ET_{c_{est}} = CF \cdot ET_r \quad [3]$$

Donde:

$ET_{c_{est}}$ = evapotranspiración estimada con factor de cobertura ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$).

ET_r = evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$).

CF = Factor de cobertura

Además, CF es el factor de cobertura estimado:

$$CF = F_1 \cdot P_C + F_2 \quad [4]$$

siendo F_1 y F_2 factores empíricos afines al cultivo, los cuales se deben determinar a partir de datos de ET_r y $ET_{c_{med}}$ de los avellanos *in situ*. F_1 se asocia a la transpiración y se relaciona con el porcentaje de cobertura del frutal y F_2 busca cuantificar el porcentaje de evaporación en el marco de plantación. F_2 fue previamente calculado con el modelo propuesto por Souto (2019), este porcentaje de evaporación varía según el método de riego utilizado. Y P_C es el porcentaje de cobertura, que se define como el porcentaje de área sombreada al medio día solar con respecto al marco de plantación (Ecuación 5).

$$P_C = \frac{SA}{H \cdot L} \quad [5]$$

Donde:

SA = proyección de la sombra a medio día solar (m^2)

H = distancia entre hilera (m)

L = distancia entre plantas sobre la hilera (m)

4.5 Factor de cultivo (FC)

El Factor de cultivo representa la respuesta de la planta al actual régimen de gestión del agua, ya sea asociado con riego o lluvia (Ecuación 6). Los valores inferiores a 1 implican que la evapotranspiración de campo es menor que la evapotranspiración potencial (Holzapfel et al., 2020).

$$FC = \frac{ET_c}{ET_r} \quad [6]$$

Donde:

FC = Factor de cultivo (adimensional)

ET_c = evapotranspiración de cultivo ($mm \cdot d^{-1}$)

ET_r = evapotranspiración de referencia ($mm \cdot d^{-1}$)

4.6 Factor de riego (IF)

El factor de riego entrega una relación de la cantidad de agua que se está aplicando respecto a la ET_r . Valores mayores que 1 ($IF > 1$) implica que el programa de riego está aplicando más agua que la ET_r . FR se puede obtener a partir de la Ecuación 7.

$$IF = \frac{IR}{ET_o} \quad [7]$$

Donde:

IR = agua aplicada en cada sector

ET_o = evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

4.7 Suministro relativo de agua (RWS)

La definición de suministro relativo de agua (RWS) es la relación entre la cantidad de agua recibida por el cultivo (riego más precipitación) y la demanda de agua asociada con los cultivos y con las prácticas culturales realmente utilizadas. Los valores de RWS se derivan de observaciones y mediciones de campo (Sakthivadivel et al., 1993). Para obtener el indicador de Suministro relativo de agua se utiliza la Ecuación 8.

Para obtener el indicador de Suministro relativo de agua:

$$RWS(\%) = \frac{IR+ER}{ET_{pot}+SP} \cdot 100 \quad [8]$$

Donde:

IR = volumen de agua de riego (mm)

ER = volumen de precipitaciones (mm)

SP = pérdidas por percolación (mm)

ET_{pot} = evapotranspiración potencial (mm)

4.8 Análisis de datos

El análisis de los datos se lleva a cabo a través de indicadores de bondad de ajuste, tales como el error cuadrático medio (RMSE), diferencias relativas (RD), entre otros. RMSE y RD se pueden obtener mediante la Ecuación 9 y 10, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad [9]$$

Donde:

\hat{y}_i = valor modelado.

y_i = valor medido.

i = número de valores observados.

- Diferencias relativas (RD):

$$RD (\%) = \frac{RMSE}{obs\ avg} \cdot 100 \quad [10]$$

Donde: *obs avg* = promedio de los datos observados.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Factor de Cobertura

De acuerdo con el procedimiento de calibración del factor de cobertura, de las Ecuaciones 3 y 4 se obtuvieron los valores de F_1 y F_2 durante cuatro temporadas de riego. En la Tabla 2 se puede observar los valores de F_1 y F_2 para este estudio. Cabe mencionar que debido a la falta de datos en la temporada 2019-2020, que se debe a que ocurrieron problemas técnicos con el almacenamiento de los datos de la estación EC, se estableció que dicha temporada fuera poco representativa y no se incluyó para aplicar la metodología propuesta en esta investigación.

Tabla 2. Factores de cobertura obtenidos durante tres temporadas de riego.

| Temporada | F_1 | F_2 |
|-----------|-------|-------|
| 2017-2018 | 0.98 | 0.25 |
| 2018-2019 | 0.98 | 0.25 |
| 2020-2021 | 1.0 | 0.25 |

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos de F_1 durante las temporadas de riego que se muestran en la Tabla 2, se obtuvieron considerando los indicadores de ajuste de bondad de las Ecuaciones 9 y 10, correlación de Pearson (R^2), la correcta distribución de la evapotranspiración a lo largo de la temporada y los volúmenes acumulados al final de cada temporada. El valor obtenido de F_2 fue determinado en un estudio previo en Pullami y representa la evaporación de agua desde el suelo.

De la estimación de los factores de cobertura, es necesario precisar que se obtuvieron del manejo del huerto y por ello no pueden ser considerados como valores potenciales, ya que no hay certeza de que este represente el valor óptimo en el manejo de riego. Parte de la medición del P_C se llevó a cabo en el sitio de estudio "Pullami" y el resto se obtuvo con un análisis realizado mediante la plataforma GEE.

En la Figura 2 se muestra la calidad de ajuste del factor de cobertura obtenido para cuatro temporadas de riego. Durante las temporadas 2017-2018, 2018-2019 y 2020-2021, hubo complicaciones en la toma de datos de la estación EC y en la estación Agromet "Coihueco", por lo que existen algunos intervalos de fechas en las que no hubo datos.

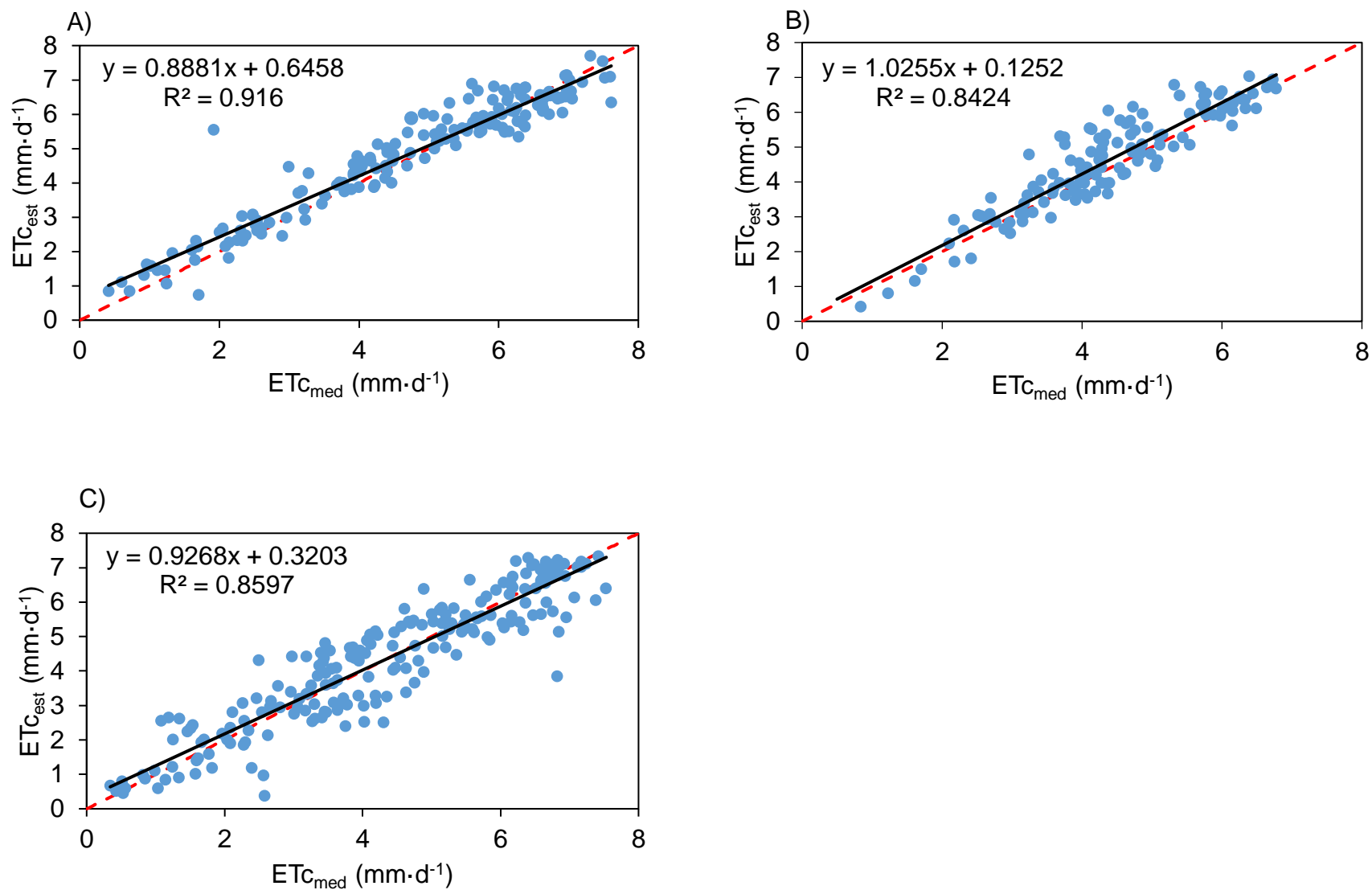


Figura 2. Comparación de la demanda estimada (ETC_{est}) y la demanda medida (ETC_{med}) para las temporadas A) 2017-2018, B) 2018-2019 y C) 2020-2021. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se puede observar que las comparaciones presentan una correlación bastante aceptable, obteniendo valores de R^2 entre 0.84 y 0.92, es necesario hacer hincapié en que el valor de correlación más bajo corresponde a la temporada 2018-2019, en la cual hay una ausencia importante en la cantidad de datos de evapotranspiración medida ($ET_{c_{med}}$), lo que afectó la correlación.

Tabla 3. Índices RMSE y RD de la calibración del factor de cobertura (F_c), para las temporadas analizadas.

| Temporada | RMSE (mm·d ⁻¹) | RD (%) |
|-----------|-------------------------------|-----------|
| 2017-2018 | 0.6 | 11.8 |
| 2018-2019 | 0.7 | 15.8 |
| 2020-2021 | 0.8 | 18.2 |

Fuente: Elaboración propia.

Según los indicadores de bondad de ajuste de la Tabla 3 y la Figura 2, la $ET_{c_{est}}$ refleja con una exactitud aceptable la evapotranspiración medida, con una buena dispersión y un error que no debería afectar de forma significativa en la estimación de la ET_c para programar el calendario de riego. Además, estos factores de cobertura no deberían experimentar cambios debido a que es un huerto de avellanos adulto y no tendrán cambios morfológicos importantes y tampoco modificaciones en el sistema de riego ni en su calendario.

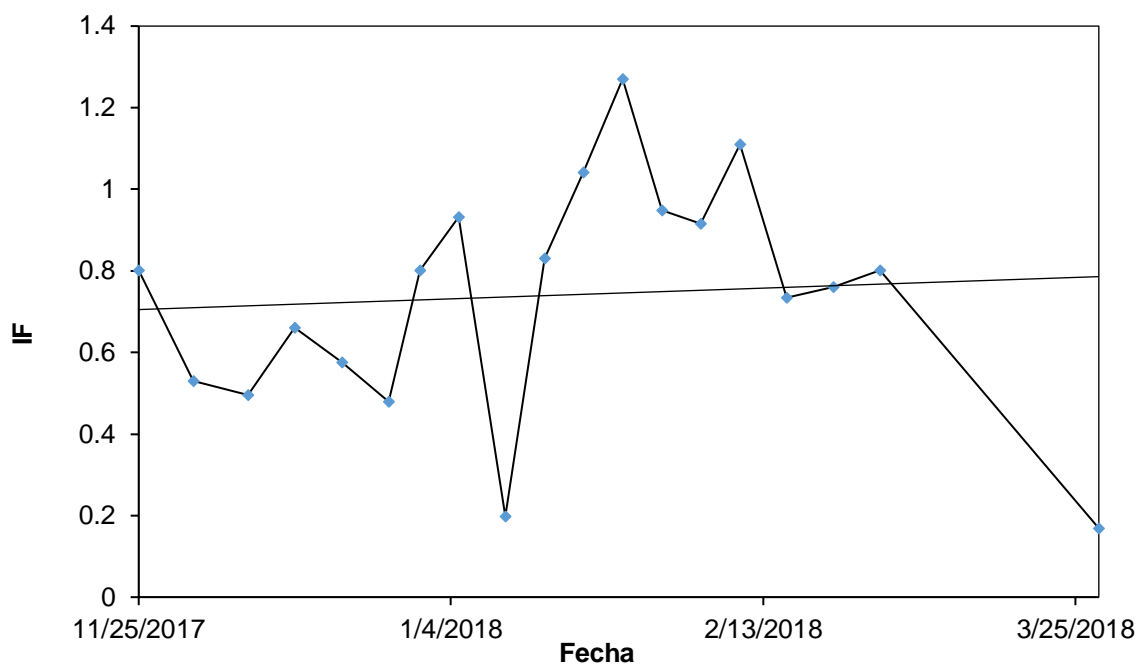


Figura 3. Factor de riego (IF) para la temporada 2017-2018. Fuente: Elaboración propia.

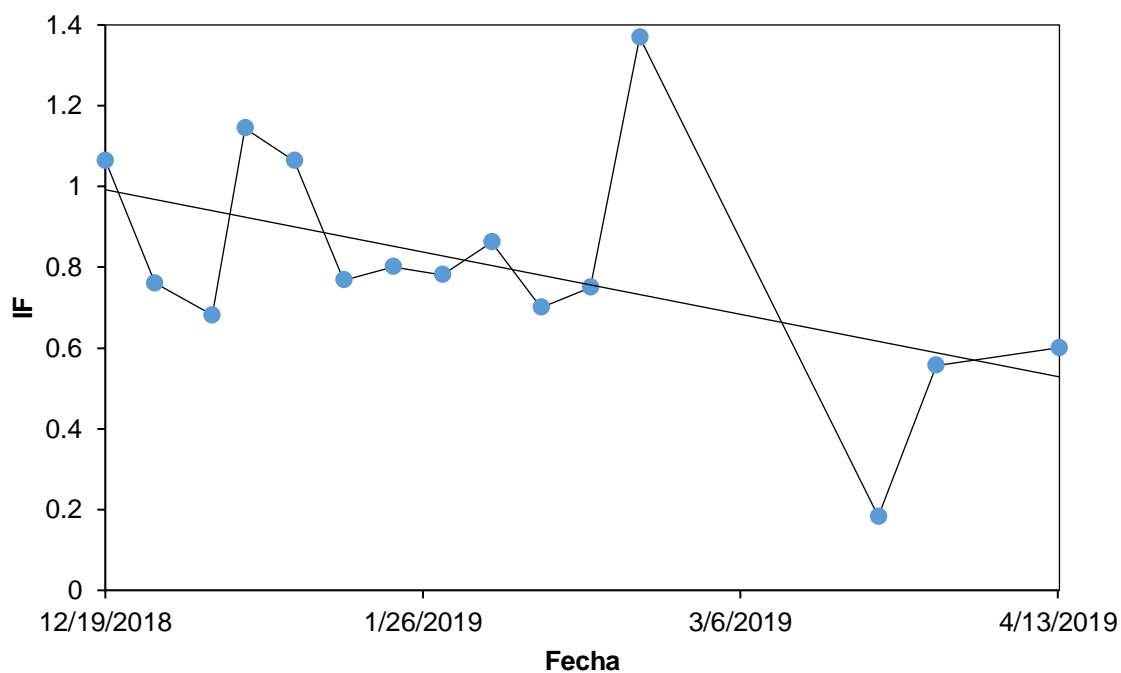


Figura 4. Factor de riego (IF) para la temporada 2018-2019. Fuente: Elaboración propia.

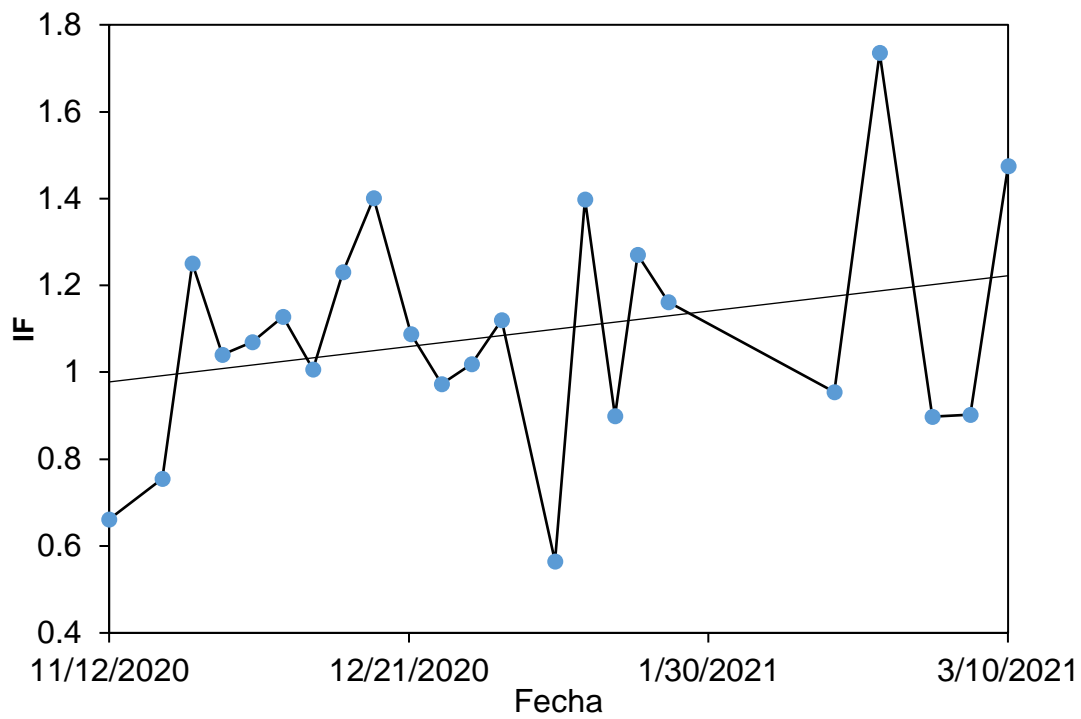


Figura 5. Factor de riesgo (IF) para la temporada 2020-2021. Fuente: Elaboración propia.

De los valores de las Figuras 3, 4 y 5 se puede observar que la temporada que mayor estabilidad presenta es la temporada 2020-2021, presentando mayor estabilidad y mayor número de riegos que las demás temporadas. Por lo que esta temporada se utilizó para realizar las comparaciones entre la demanda estimada, real y obtenida desde el satélite, también se utilizaron los valores de $F_1 = 1.00$ y $F_2 = 0.25$ para realizar la comparación.

5.2. Evapotranspiración determinada con Google Earth Engine

Se obtuvo la evapotranspiración, medida, estimada y con imágenes satelitales de los avellanos, para estas últimas es necesario determinar la calidad de la estimación de las variables del balance de energía a partir de las imágenes satelitales, frente a los valores medidos por la estación Eddy Covariance, densidad de flujo de calor en el suelo (G), el flujo de calor sensible en el aire (H) y radiación neta (R_N) son las variables a comparar para saber la calidad de la estimación de evapotranspiración con las imágenes.

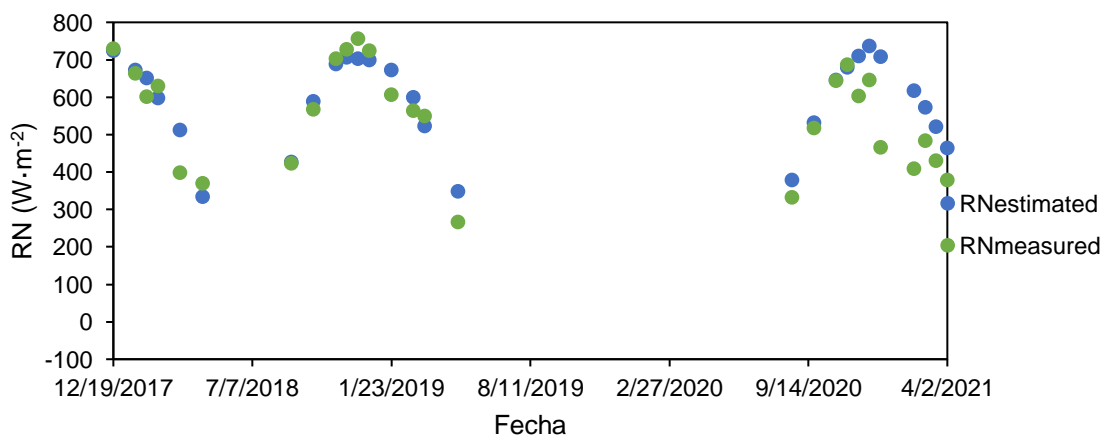


Figura 6. Radiación neta medida con estación EC (RNmeasured) y estimado con imágenes satelitales (RNestimated). Fuente: Elaboración propia.

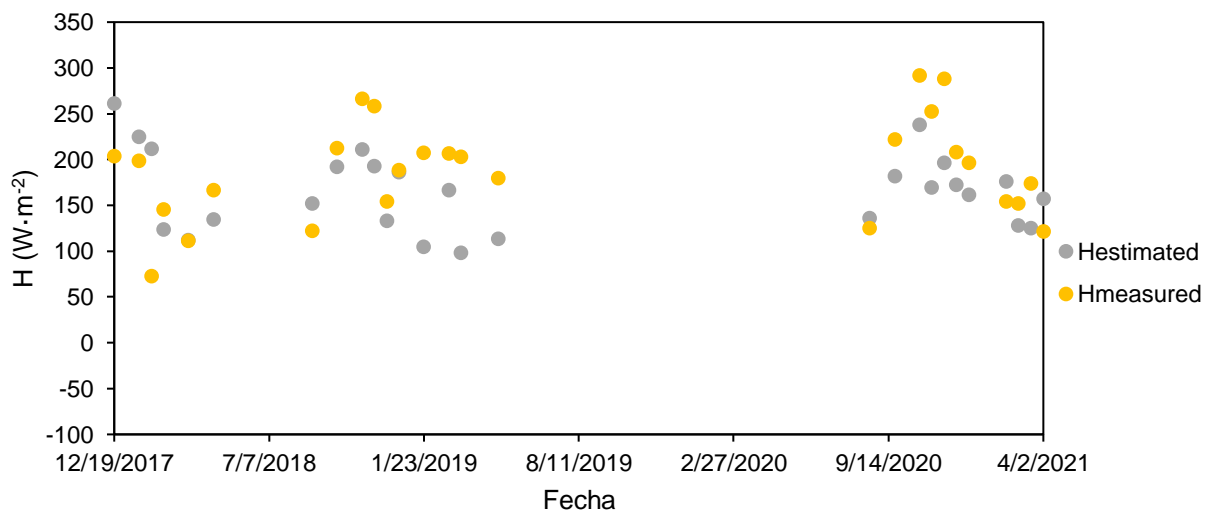


Figura 7. Flujo de calor sensible medido con estación EC (H_{measured}) y estimado con imágenes satelitales ($H_{\text{estimated}}$). Fuente: Elaboración propia.

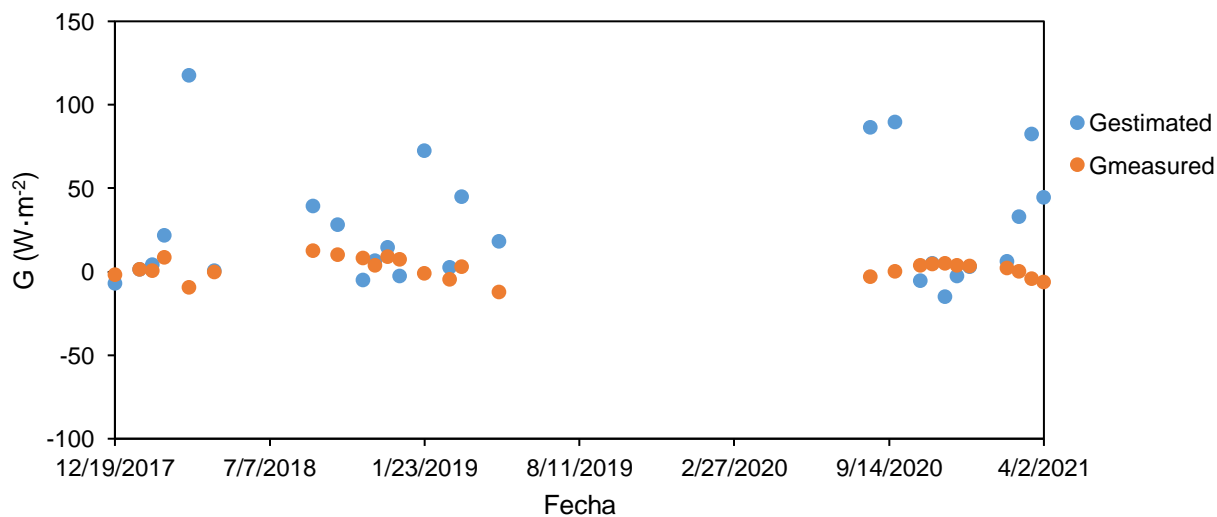


Figura 8. Densidad de Flujo de calor en el suelo medido con estación EC (G_{measured}) y estimado con imágenes satelitales ($G_{\text{estimated}}$). Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 6, 7 y 8 se puede apreciar que entre las variables medidas y observadas, existe una dispersión similar entre los valores medidos y estimados, también es necesario.

Para obtener una idea de la performance del comportamiento con imágenes satelitales, se utilizaron indicadores estadísticos y así medir la calidad de la estimación.

Tabla 4. Error cuadrático medio (RMSE) y diferencias relativas (RD), para las variables estimadas con imágenes satelitales.

| Variable | RMSE ($W \cdot m^{-2}$) | RD (%) |
|----------------|------------------------------|-----------|
| G | 45.4 | 2496.5 |
| H | 57.5 | 29.7 |
| R _N | 76.9 | 13.9 |

De acuerdo con la Figura 6, 7 y 8 y demás de la Tabla 4, el valor del flujo de calor en el suelo es sobreestimado en el análisis con imágenes y también el flujo de calor sensible, pero en menor medida, la radiación neta presenta una buena dispersión e indicadores de error aceptables, considerando que los demás flujos de calor son obtenidos mediante la radiación.

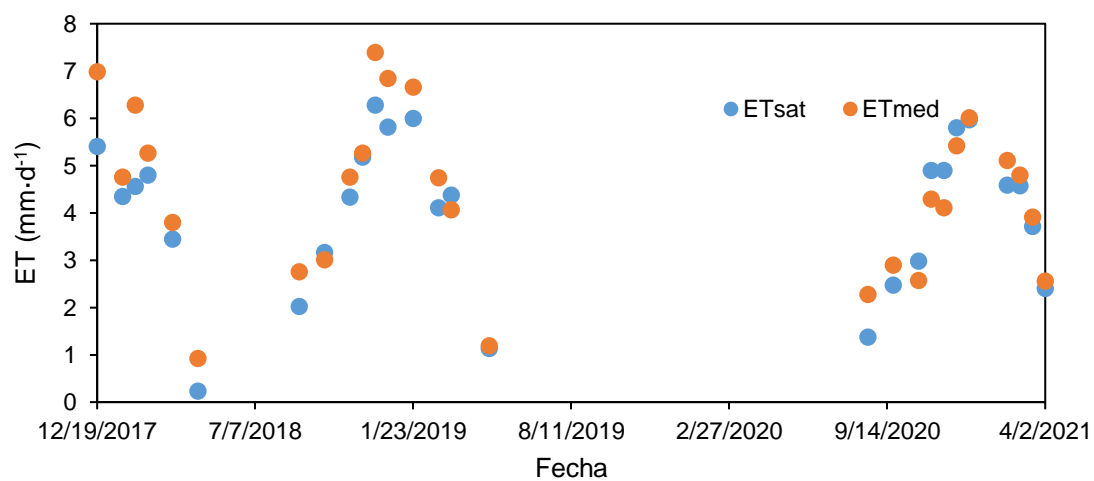


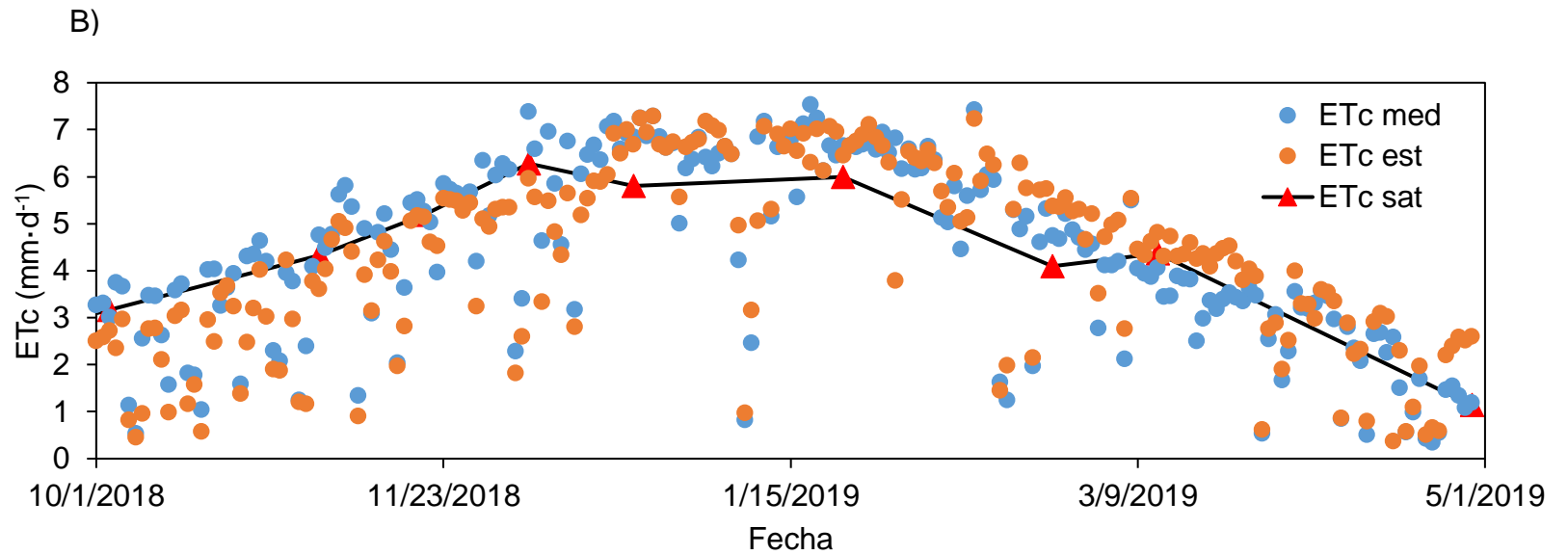
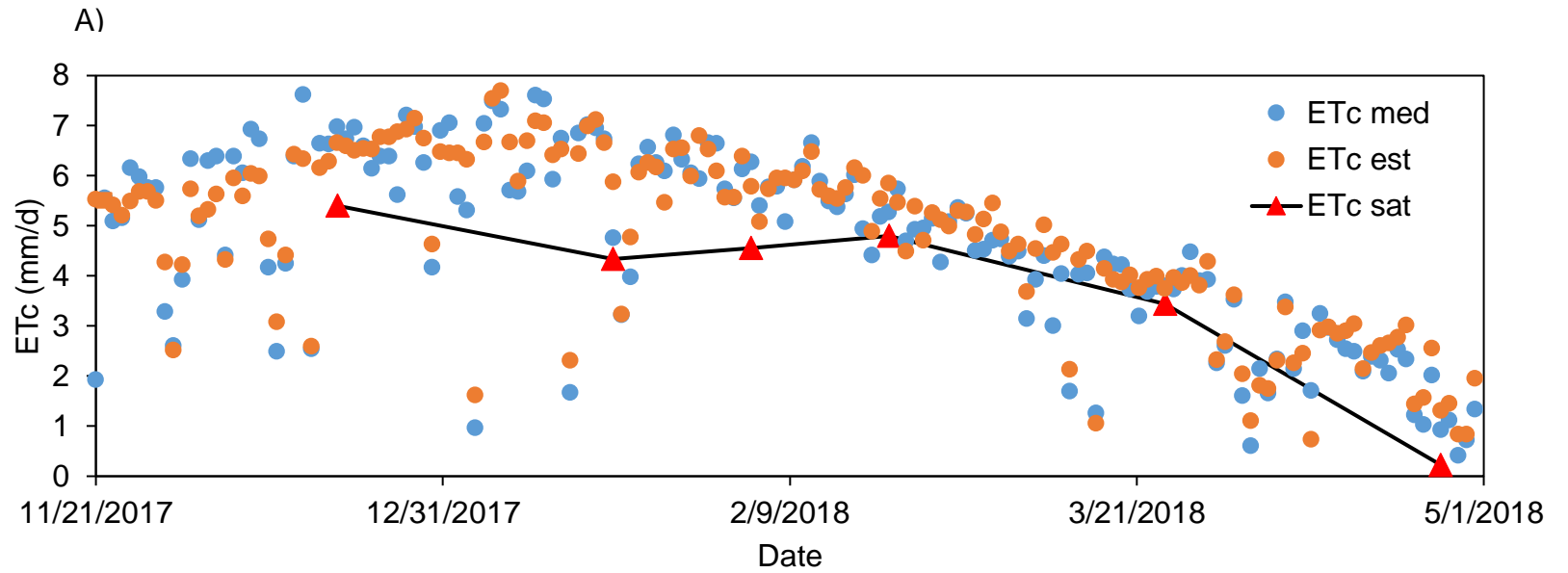
Figura 9. Evapotranspiración de cultivo medida ($ET_{c_{med}}$) y satelital ($ET_{c_{sat}}$), para las tres temporadas analizadas. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluaron los resultados que se muestran en la Figura 9, mediante los indicadores de bondad de ajuste (Ecuación 9 y 10) con el fin de establecer la calidad de la evapotranspiración de satélite ($ET_{c_{sat}}$), respecto de la evapotranspiración medida con la estación EC.

Tabla 5. Error cuadrático medio (RMSE) y diferencias relativas (RD), para la evapotranspiración medida con satélite ($ET_{c_{sat}}$).

| Temporada | RMSE (mm·d ⁻¹) | RD (%) |
|-----------|-------------------------------|-----------|
| 2017-2018 | 1.03 | 22.2 |
| 2018-2019 | 0.62 | 12.7 |
| 2020-2021 | 0.43 | 10.1 |

De la Figura 9 y Tabla 5 se puede observar los resultados obtenidos de las imágenes satelitales e indicadores de ajuste de bondad, la evapotranspiración posee una distribución muy similar a la de los valores medidos, además los valores son muy similares entre sí, destacando entre ellos la última temporada (2020-2021). Lo anterior se debe a la calidad de los datos obtenidos en la Tabla 5 y la precisión de estimación del modelo SEB-PV.



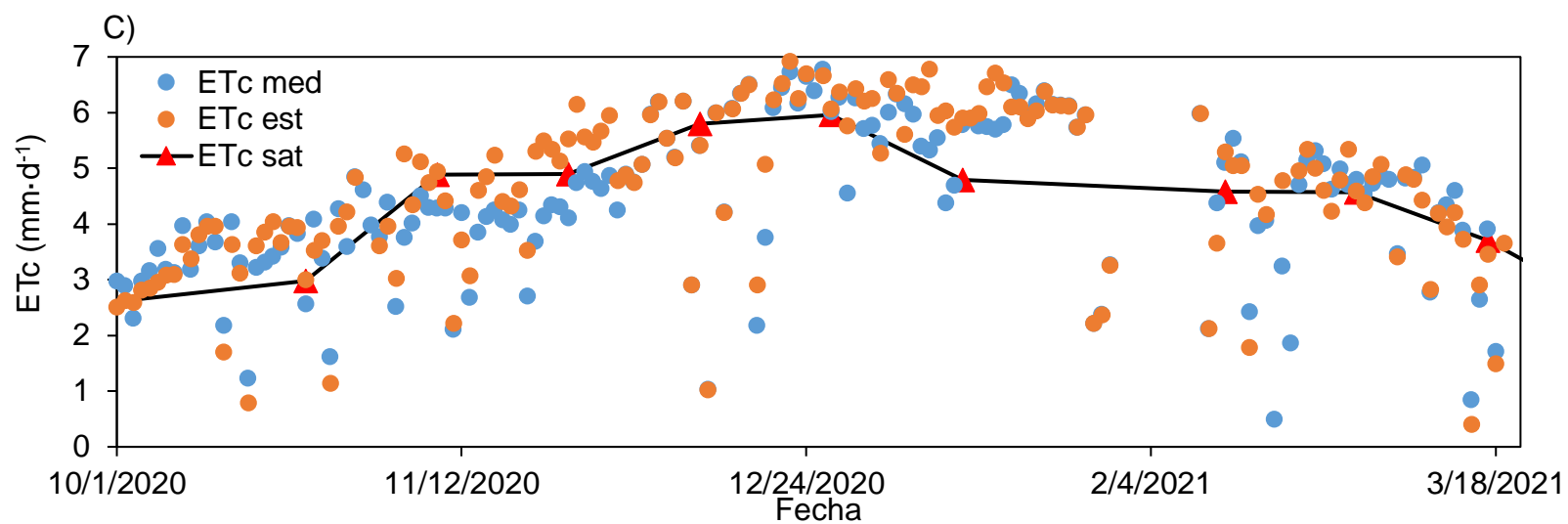


Figura 10. Evapotranspiración medida (ETc med), estimada (ETc est), y de satélite (ETc sat), para las temporadas A)2017-2018, B)2018-2019 y C)2020-2021. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Comparación entre ET_c medida, estimada y satelital

Con el fin de conocer la calidad de los valores obtenidos, se compararon con los valores medidos por la estación EC, hay que tener en cuenta que en algunas temporadas no están completas y también que se descartó la temporada 2019-2020 ya que había dos imágenes Landsat 8 durante esas temporadas (de octubre a marzo).

Tabla 6. Error cuadrático medio (RMSE) y diferencia relativa (RD), evapotranspiración calculada por análisis satelital a lo largo de cada temporada.

| Temporada | RMSE (mm·d ⁻¹) | RD (%) |
|-----------|-------------------------------|-----------|
| 2017-2018 | 1.5 | 31.7% |
| 2018-2019 | 1.5 | 34.6% |
| 2020-2021 | 1.3 | 28.6% |

Los valores de la Tabla 6 se obtuvieron con las ecuaciones 6 y 7, también se pudo observar que al comparar la Tabla 6 con la Tabla 4 que, en todas las temporadas, la Evapotranspiración estimada ($ET_{c_{est}}$) tuvo un mejor desempeño que la obtenida de satélite ($ET_{c_{sat}}$) comparado con el RMSE = 1.5 mm·d⁻¹ y el RD= 34.6% que fue el peor desempeño que tuvo la evapotranspiración estimada. Lo anterior podría estar asociado a que los valores de evapotranspiración obtenida con satélite son datos puntuales, lo que resulta en una dependencia muy importante al realizar la interpolación lineal entre datos de $ET_{c_{sat}}$, es decir si la imagen satelital fue capturada un

día atípico, puede que la interpolación no represente de buena forma los valores diarios entre imágenes del Landsat 8.

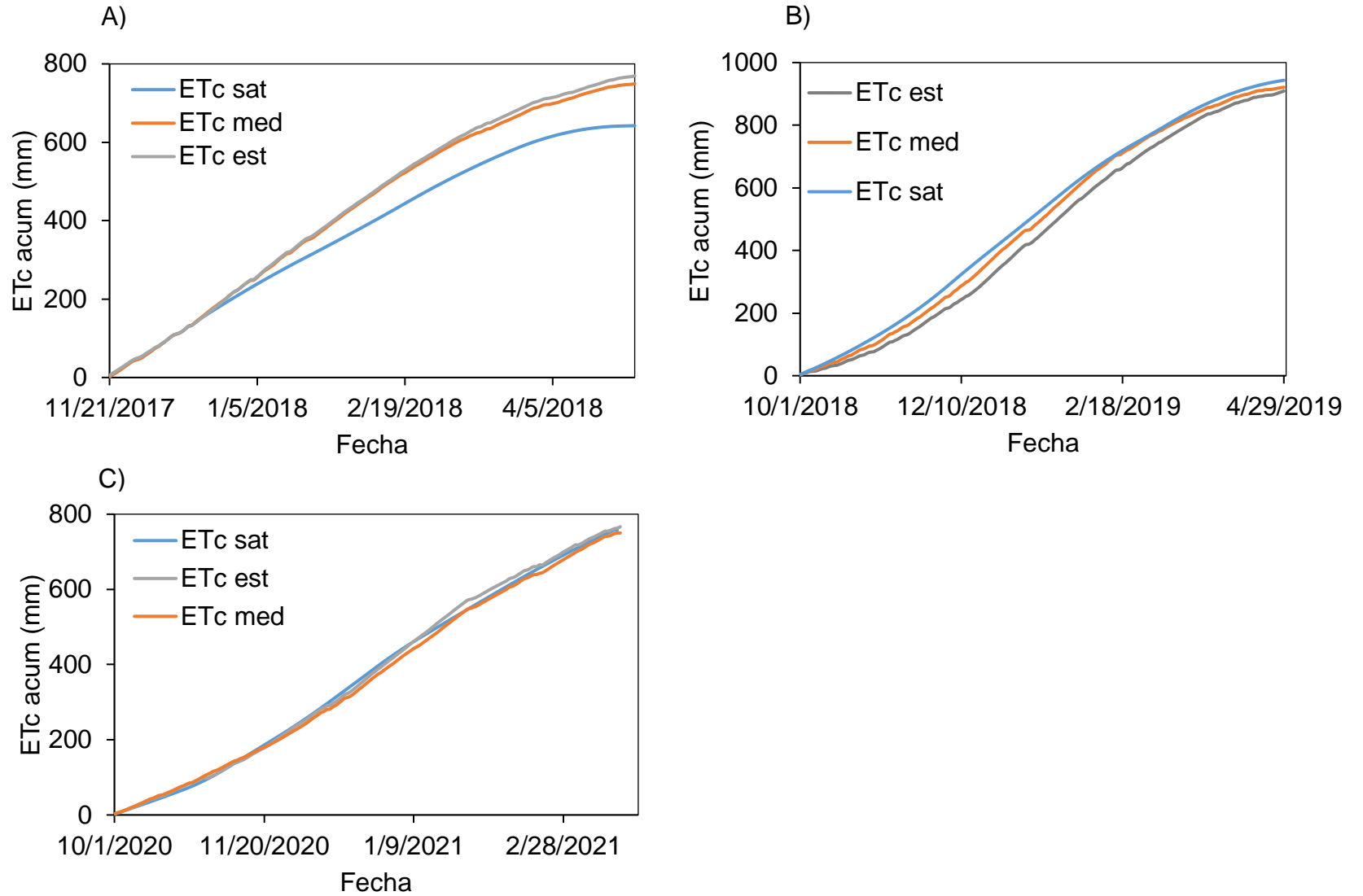


Figura 11. Evapotranspiración acumulada estimada, satélite y medida, para temporadas A)2017-2018, B)2018-2019 y C)2020-2021. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se observa que la evapotranspiración obtenida del satélite ($ET_{C_{sat}}$), en todas las temporadas es menor que la medida ($ET_{C_{med}}$) y la estimada ($ET_{C_{est}}$), mientras que esta ultima representa de buena forma la demanda hídrica medida de los avellanos. Se debe considerar que, en el caso de la evapotranspiración obtenida a través del satélite, las imágenes están muy separadas en intervalo de fechas, por lo que el cálculo de la demanda entre dichas fechas puede afectar la curva de evapotranspiración acumulada.

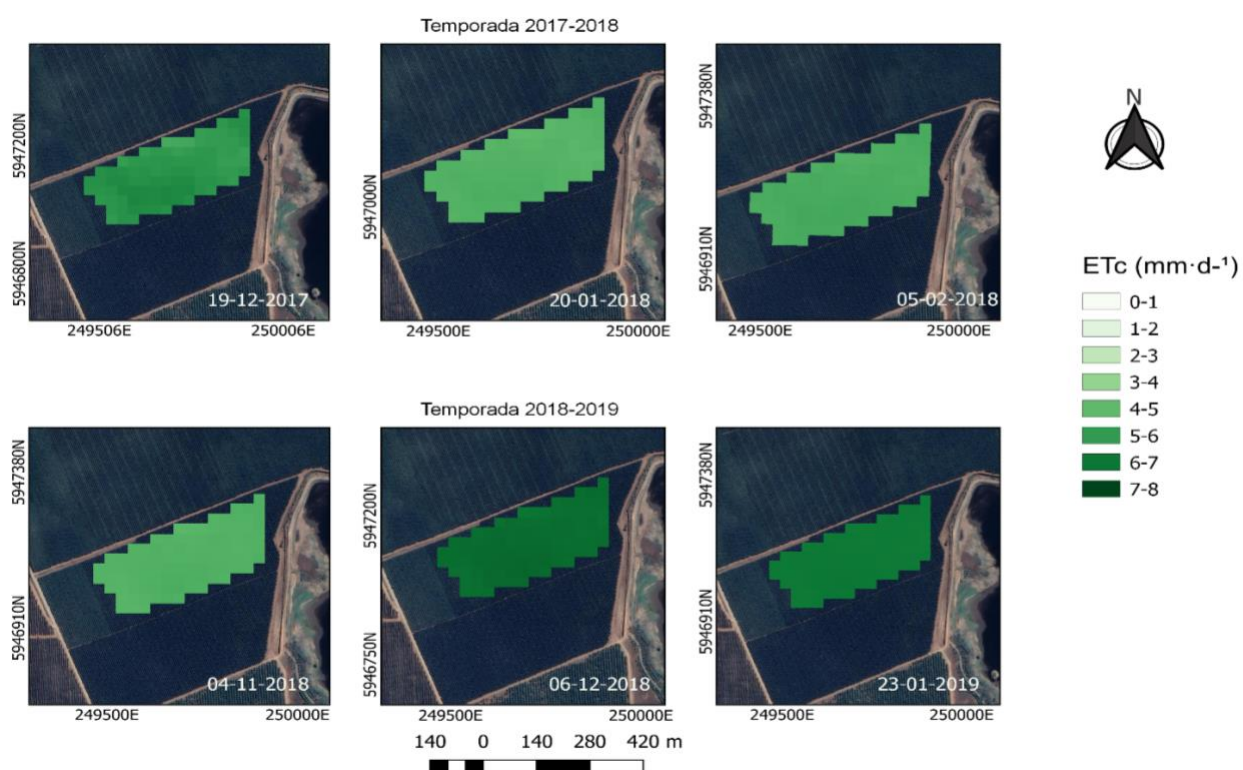


Figura 12. Mapa de evapotranspiración medida por satélite ($ET_{C_{sat}}$) para las temporadas 2017-2018 y 2018-2019. Fuente: Elaboración propia.

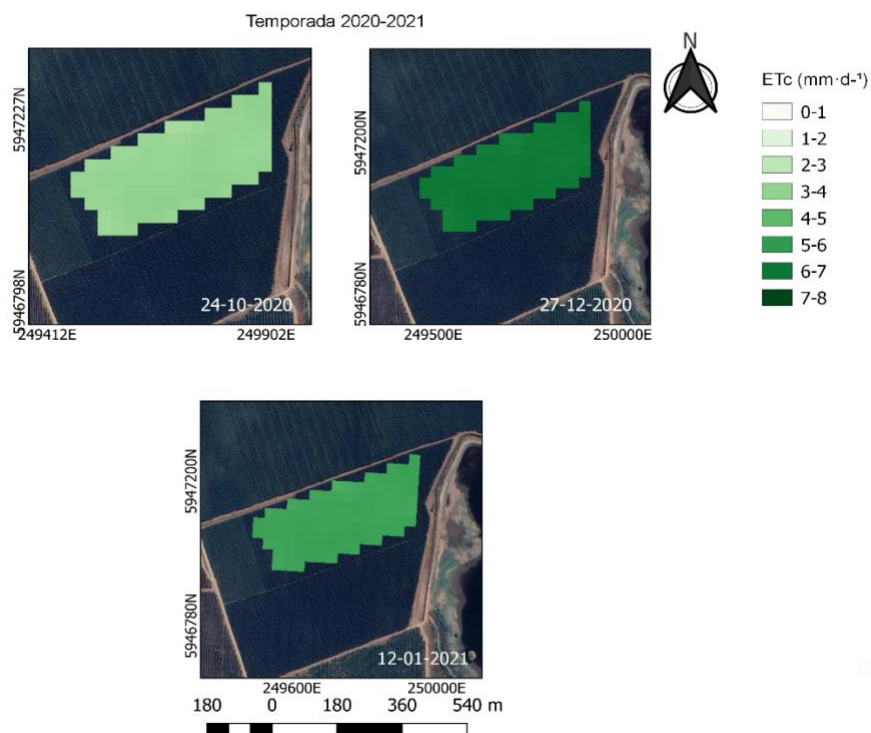


Figura 13. Mapa de evapotranspiración medida por satélite ($ET_{c_{sat}}$) para la temporada 2020-2021. Fuente: elaboración propia

De las Figuras 12 y 13 se pudo observar que la evapotranspiración ($ET_{c_{sat}}$) es homogénea espacialmente en todas las temporadas, teniendo en consideración que abarca un área de 6.3 Ha de avellano. Esto permite inferir que las variables biofísicas son muy similares y también el suelo es bastante homogéneo en la superficie de estudio, presentando variaciones menores a 1 mm de $ET_{c_{sat}}$.

5.4. Evaluación del programa de riego

Para realizar un análisis que permita evaluar el manejo del huerto, primero se seleccionaron los valores de FC que sirvieron de referencia para la comparación con el factor de cultivo obtenido mediante imágenes satelitales y con FR que representa el régimen de riego de acuerdo con el criterio del agricultor. Recordando que los factores seleccionados son $F_1=1.00$ y $F_2=0.25$.

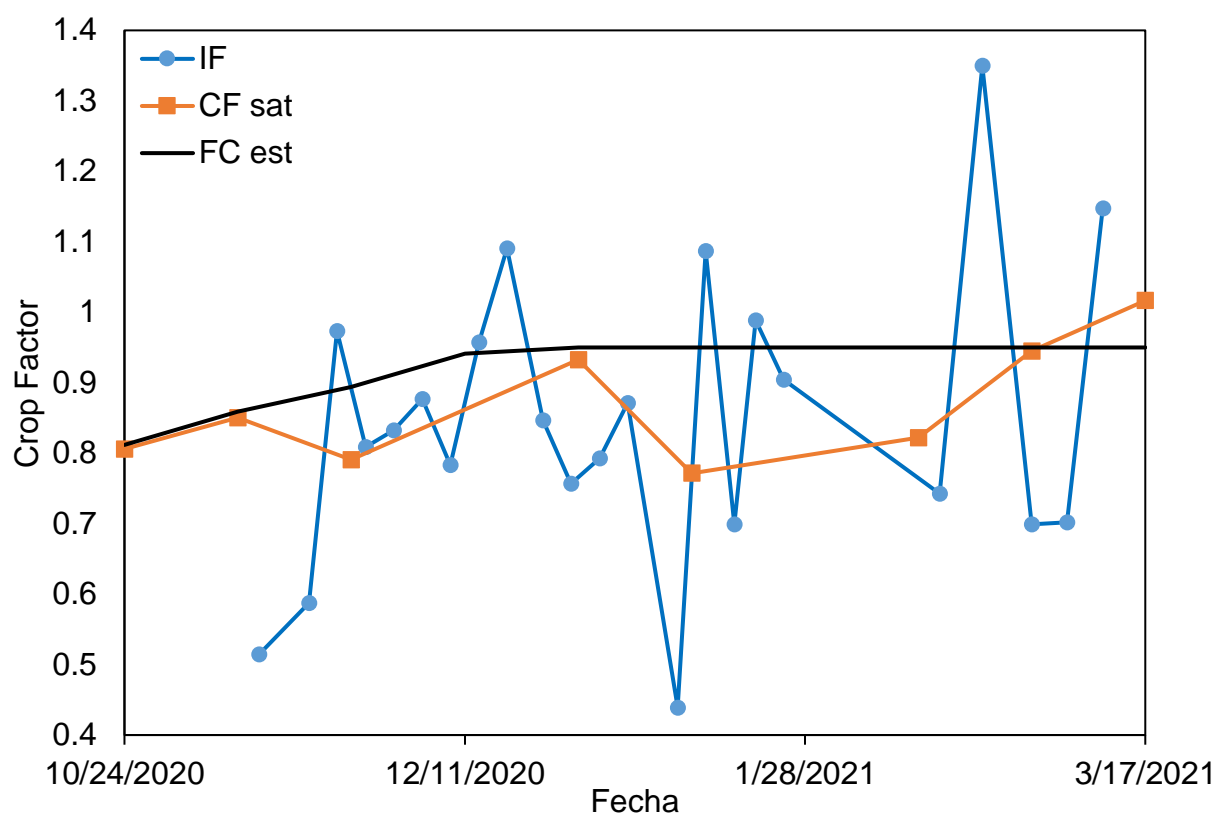


Figura 14. Factor de riego (IF), factor de cultivo obtenido mediante imágenes satelitales (CF sat), factor de cobertura estimado (FC est) para la temporada 2020-2021. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 14 se desprende que el FR no sigue un patrón similar al FC est, que es lo que se esperaría si el programa de riego fuera planificado

adecuadamente. También se observa que no hay una tendencia clara en el IF que refleje la demanda del avellano europeo. Es importante mencionar que durante las fechas en que se realizó la comparación no existieron precipitaciones efectivas que pudieran influir en el contenido de humedad del suelo, por lo que la dispersión del FC se atribuyó a una deficiente planificación del riego.

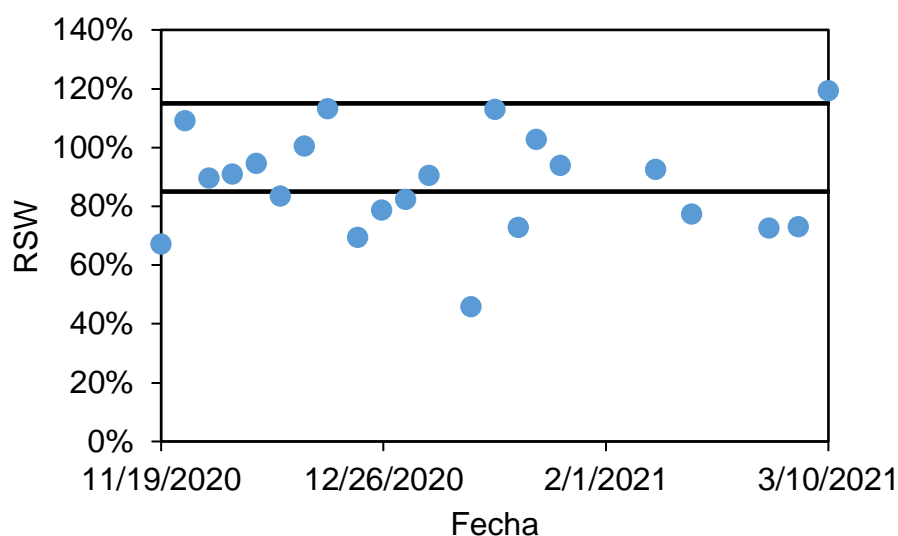


Figura 15. Suministro relativo de agua (RSW). Fuente Elaboración propia

De la Figura 15 se puede observar que alrededor del 52% de los riegos no están en los rangos adecuados (85% a 115%), donde para este caso, la mayoría del riego ha sido insuficiente y solo en dos ocasiones han sido excesivos, aplicando mayor cantidad de agua de la que necesita el cultivo, concluyendo que no han sido satisfechas de forma adecuada las necesidades hídricas durante la temporada 2020-2021.

5.5. Recomendaciones

Para representar los volúmenes asociados a los factores de la Figura 15, se puede observar las diferencias de volumen por planta a lo largo de la temporada 2020-2021.

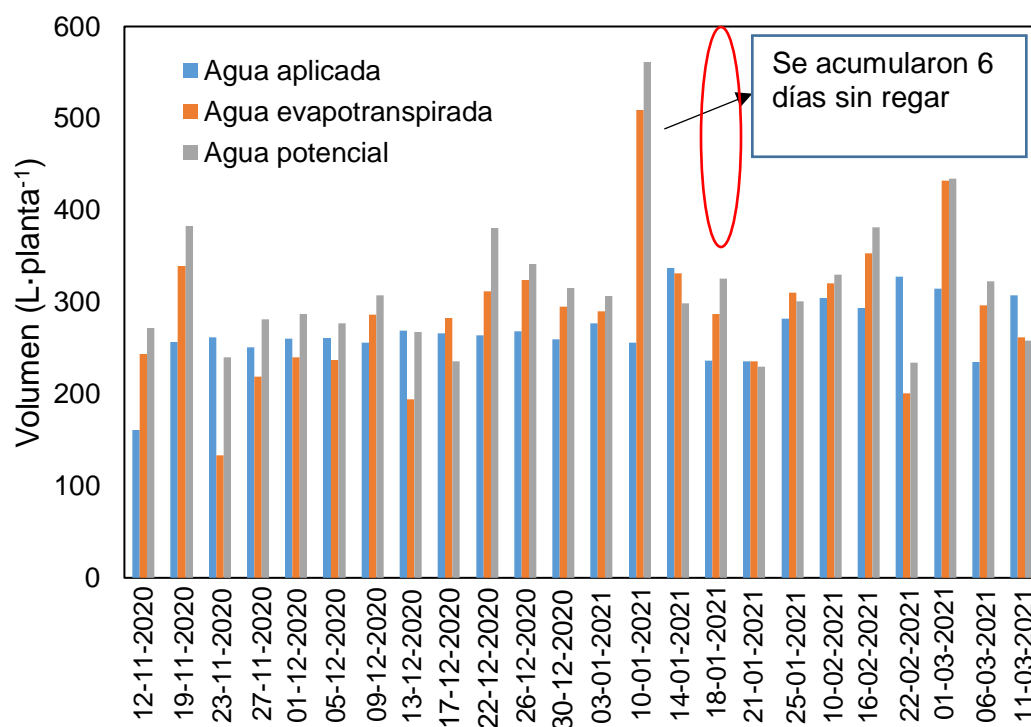


Figura 16. Volúmenes de agua aplicada, evapotranspirada y potencial durante la temporada 2020-2021. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 16, en la gran mayoría de los casos, el agua potencial es mayor al agua aplicada, lo que implica que la planta de avellano no se encontró en los rangos óptimos de humedad durante la temporada. El otro aspecto que llama la atención es cuando inicia la

temporada, donde comienza aplicando una cantidad constante de agua, para luego aumentar los volúmenes aplicados desde el 14 de enero en adelante.

Como recomendación se sugiere utilizar el factor de cobertura estimado para realizar el balance diario y así planificar el calendario de riego de forma más eficiente y estable a lo largo de la temporada.

5. CONCLUSIÓN

Se determinó la evapotranspiración del avellano europeo medido con la estación EC encontrando valores de 749 mm, 869 mm y 705 mm para las temporadas 2017-2018, 2018-2019 y 2020-2021. Al comparar ETc medido con los estimado por el satélite (ETc sat) se obtuvo un RMSE de 1.5 mm·d⁻¹, 1.5 mm·d⁻¹ y 1.3 mm·d⁻¹ y un RD de 31.7%, 34.6% y 28.6%, para las tres temporadas respectivamente.

Se calibraron los valores de F₁ y F₂ para determinar la evapotranspiración del avellano utilizando el porcentaje de cobertura son 1.00 y 0.25 respectivamente, que corresponde a la temporada 2020-2021 con un RMSE 0.8 mm·d⁻¹ y RD 18.2% al realizar el ajuste. Con estos factores se determinó que la demanda anual estimada del avellano europeo, para los periodos 2017-2018, 2018-2019 y 2020-2021 fueron de 769 mm, 870mm y 754 mm respectivamente.

Se determinó la demanda de agua del avellano europeo mediante el modelo SEV-PV con imágenes satelitales durante las temporadas 2017-2018, 2018-2019 y 2020-2021. La evaluación mostró un RMSE de 1.03 mm·d⁻¹, 0.62 mm·d⁻¹, 0.43 mm·d⁻¹ y RD 22.2%, 12.7% y 10.1%, para las tres temporadas respectivamente.

Se analizó el suministro relativo de agua (RSW), para el actual manejo del riego, mostrando que alrededor del 52% de los riegos no satisfacen adecuadamente la necesidad hídrica del avellano europeo, por lo que se

recomienda mejorar el programa de riego del agricultor guiándose por la planificación realizada con el factor de cobertura.

6. LITERATURA CITADA

1. Allen, R.G., M. Tasumi and R. Trezza. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133(4): 380-394.
2. Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *J. Hydrol.* 212-213: 198-212.
3. Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B.P. Thoreson and R.G. Allen. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131(1): 85-93.
4. Cigarra, L.E. 2020. Estimación de la evapotranspiración instantánea en frutales mediante el modelo SEB-PV con imágenes aéreas y de satélite en Chile y California. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.
5. Delgado, J.A., N.M. Short., D.P. Roberts and B. Vandenberg. 2019. Big data analysis for sustainable agriculture on a geospatial cloud framework [en línea]. *Front. Sustain. Food Syst.* 3: 54(Art. N°). <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00054>>. [Consulta: 13 junio 2021].
6. Holzapfel, E., M. Lillo-Saavedra, D. Rivera, V. Gavilán, A. García-Pedrero and C. Gonzalo-Martín. 2020. A satellite-based ex post analysis of water management in a blueberry orchard [en línea]. *Comput. Electron. Agric.* 176. <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105635>>. [Consulta: 13 junio 2021].
7. Jara, J.C. 2020. Requerimientos hídricos de cultivos y frutales. pp: 6-26. En: E. Holzapfel, D. Rivera y J.L. Arumí (Eds.). *Tecnología de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable.* (2a. ed.). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
8. Lagos, L.O., G. Merino, D. Martin, S. Verma and A. Suyker. 2012. Evapotranspiration of partially vegetated surfaces. pp: 273-304. In: A. Irmak (Ed.). *Evapotranspiration - Remote sensing and modeling.* InTech. Rijeka, Croatia.
9. OECD (Francia). 2020. OCDE FAO: perspectivas agrícolas 2020 2029. OECD Publishing. FAO. Paris, Francia.

10. Sakthivadivel, R., D.J. Merrey and N. Fernando. 1993. Cumulative relative water supply: A methodology for assessing irrigation system performance. *Irrig. Drain. Syst.* 7(1): 43-67.
11. Shaftel, H. 2021 Los efectos del cambio climático [en línea] NASA's Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology, USA <<https://climate.nasa.gov/efectos/>>. [Consulta: 17 octubre 2021].
12. Souto, C. I. 2019. Transpiración de cultivo y evaporación de suelo para cultivos de cobertura parcial y suelos parcialmente humedecidos. Tesis doctoral, Doctor en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos en la Agricultura. Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.