

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**CARTOGRAFÍA DE COEFICIENTES DE CULTIVO PARA OLIVO Y UVA
PISQUERA, MEDIANTE MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y SENSORES
SATELITALES**

IGNACIO ANDRÉS LOBOS SOBARZO

Santiago, Chile

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**CARTOGRAFÍA DE COEFICIENTES DE CULTIVO PARA OLIVO Y UVA
PISQUERA, MEDIANTE MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y SENSORES
SATELITALES**

**MAPPING OF CROP COEFFICIENT FOR OLIVE AND GRAPE, WITH
HYDROLOGICAL MODELLING AND SATELLITE SENSORS**

IGNACIO ANDRÉS LOBOS SOBARZO

Santiago, Chile

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**CARTOGRAFÍA DE COEFICIENTES DE CULTIVO PARA OLIVOS Y UVA
PISQUERA, MEDIANTE MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y SENSORES
SATELITALES.**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

IGNACIO ANDRÉS LOBOS SOBARZO

Profesor Guía	Calificaciones
Sr. Mauricio Galleguillos T. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr.	7,0
 Profesores Evaluadores	
Sr. Edmundo Acevedo H. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph. D.	7,0
Sr. Marcos Mora G. Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0
 Colaborador	
Sr. Carlos Faúndez U. Ingeniero Agrónomo, M. Sc.	

Santiago, Chile

2017

“No. No lo intentes. Hazlo, o no lo hagas, pero no lo intentes.”
Maestro Yoda

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todo ser vivo que colaboraron en la realización de esta memoria, como también a aquellas personas que me apoyaron en todos los años de estudio en la Universidad.

Deseo partir agradeciendo en primer lugar a mi profesor guía Mauricio Galleguillos y a mi colaborador Carlos Faúndez, por haberme ofrecido el tema de mi memoria, y por todo el tiempo, la dedicación, el conocimiento y la confianza que me entregaron en todo el transcurso de la realización de ésta.

También a los profesores Edmundo Acevedo y Marcos Mora por la disposición, las críticas y las recomendaciones dadas al momento de evaluar mi memoria.

A mis padres y en general a mi familia por el apoyo constante, en el tiempo y espacio. Y que desde pequeño me incentivaron a la superación intelectual y humana. Igualmente, a Donna a pesar de no ser parte de mi familia de sangre, es un pilar importante para este capítulo de mi vida, siendo una gran compañera.

A todas las personas que me apoyaron en toda la etapa experimental de la memoria, siempre aconsejándome, apoyándome y acompañarme hacer las mediciones en terreno, en Copiapó.

Y nunca olvidar a Albert Einstein por describir la relatividad del tiempo-espacio, que me dio la esperanza de terminar esta memoria, ya que el tiempo es relativo, además que en otro lugar del universo, podría haberme demorado mucho más.

Y finalmente se agradece al programa IDeA, FONDEF CONICYT, en cual el nombre del proyecto es “Modelo Dinámico de Demanda Hídrica Aplicable a la Gestión de Recursos Hídricos a Nivel de Cuenca.” FOLIO N° CA13I10102, por financiar esta investigación.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
DATOS Y MÉTODOS	6
Área de estudio.....	6
Datos y materiales	7
Metodología	9
Estimación de cartografía del Índice de Área Foliar (IAF) y Fracción interceptada (FI).	9
Estimación de Kc, mediante simulaciones de Evapotranspiración real por medio de HYDRUS-1D.	15
Estimación de Kc espacial, por medio de información satelital	19
Evaluación de cartografía de Kc para olivo y uva pisquera.....	20
RESULTADOS.....	21
Estimación del Índice de Área Foliar (IAF) y Fracción Interceptada (FI) por medio de técnicas satelitales	21
Olivos	21
Uva pisquera.....	23
Estimación del Kc y componentes del balance hidrológico, mediante modelación HYDRUS	27
Olivos	27
Uva pisquera.....	33
Cartografía de Kc obtenida mediante percepción remota y evaluada por HYDRUS-1D	38
Uva pisquera.....	38
DISCUSIÓN	43
Predicción de variables espaciales	43
Análisis de la Evapotranspiración a escala local.....	45
Comparación de modelos	46
CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	49

APÉNDICES.....	57
Apéndice I (Metodología).....	57
Registro de datos utilizados	57
Estimación de Evapotranspiración de referencia (ET ₀).....	59
Estimación de K _e	60
Corrección de datos PAR del ceptómetro lineal	62
Apéndice II (Resultados).....	63
Valores del coeficiente de extinción (k).....	63
Perfil de suelo.....	64
Valores de suelo, RETC y ROSETTA.....	65
Valores mínimos y máximo de IV de imágenes satelitales.....	66
Estimación de IAF y FI mediante intercepción de radiación solar (Olivos).....	67
Estimación de IAF y FI mediante intercepción de radiación solar (Uva pisquera).....	69
Estimación de K _c , K _{cbaj} y K _e máximos (Olivos).....	71
Estimación de K _c , K _{cbaj} y K _e máximos (Uva pisquera).....	73
Estimación de curva de ajuste para Índice Vegetacional espectral.....	74

ÍNDICE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cartografía de los predios, cada cuartel representado por un polígono.....	6
Figura 2. Mediciones con ceptómetro para estimación de PAR, a) en olivos cuartel de Mal Paso, b) en uva pisquera cuartel Toledo.	7
Figura 3. Ceptómetro Lineal, SunScan SS1-STD3, Delta-T Devices Ltd.	8
Figura 4. Esquema del diseño experimental.	9
Figura 5. Representación con flechas rojas el conteo del PAR que cumplen el umbral, entre ambas hileras hacia hilera.	12
Figura 6. Representación de Tf por transecto. Los rectángulos azules representan los sensores del ceptómetro no intervenidos por la cubierta vegetal.	12
Figura 7. a) Diagrama de grilla de medición en olivo, b) Diagrama de grilla de medición en uva pisquera, c) Posición de ceptómetro.	13
Figura 8. Dinámica temporal del Índice de Área Foliar en olivos, obtenido por medio de un ceptómetro lineal (gráfico superior, escala izquierda) y estimaciones satelitales del índice espectral SAVIgreen (gráfico inferior, escala derecha) en olivos para todo el periodo de estudio.	21
Figura 9. Curva de ajuste del Índice de Área Foliar obtenido por satélite (SAVIgreen) frente a los valores obtenidos por mediciones en terreno (IAF), curva exponencial (izquierda) y linealización logarítmica (derecha), esta última fue normalizada a una escala 0-1 para una mejor representación gráfica.	22
Figura 10. Curva de ajuste de FI en olivos por satélite y mediciones en terreno.....	23
Figura 11. Dinámica temporal FI, IAF y SAVIgreen, en uva pisquera para todo el periodo de estudio.	24
Figura 12. Curva de ajuste de IAF en uva pisquera, obtenido por satélite y mediciones en terreno (IAF), curva exponencial (izquierda) y linealización logarítmica (derecha), esta última fue normalizada a una escala 0-1 para una mejor representación gráfica.....	25
Figura 13. Curva de ajuste de FI en uva pisquera, por satélite y mediciones en terreno.....	25
Figura 14. Cartografía del Índice de Área Foliar (IAF) a partir de imágenes satelitales para inicio, pleno desarrollo y senescencia de las plantas en el predio de uva pisquera.	26
Figura 15. Serie temporal de valores acumulados en (mm) de riegos y ET0, en olivos.	28
Figura 16. Variables del balance hídrico en (mm) para 3 plantas de olivo, cuartel	

Mallorquina.....	28
Figura 17. Variables del balance hídrico (mm) para 3 plantas de olivo, cuartel Mal Paso.	29
Figura 18. Serie temporal de Kc de olivos en el cuartel Mallorca.....	29
Figura 19. Serie temporal de Kcb, Kcbmax, Ke y Kemax en relación al riego del cuartel Mallorca.....	30
Figura 20. Serie temporal de Kc de olivos en el cuartel Mal Paso.	30
Figura 21. Serie temporal de Kcb, Kcbmax, Ke y Kemax en relación al riego del cuartel Mal Paso.....	31
Figura 22. Serie temporal de valores acumulados de variables del balance hídrico (mm), en olivos del cuartel Mallorca.....	31
Figura 23. Serie temporal de valores acumulados de transpiración potencial y real (mm), en olivos del cuartel Mallorca.....	32
Figura 24. Serie temporal de valores acumulados de variables del balance hídrico (mm), en olivos del cuartel Mal Paso.	32
Figura 25. Serie temporal de valores acumulados de transpiración potencial y real (mm), en olivos del cuartel Mal Paso.	33
Figura 26. Serie temporal de valores acumulados de riegos (mm) y ET0 en uva pisquera.	33
Figura 27. Variables del balance hídrico (mm) para uva pisquera, cuartel 1 Toledo.	34
Figura 28. Serie temporal de Kc de uva pisquera, en el cuartel Toledo	35
Figura 29. Serie temporal de Kcb, Kcbmax, Ke y Kemax en relación al riego del cuartel.	36
Figura 30. Serie temporal de valores acumulados de transpiración potencial y real (mm), en uva pisquera del cuartel Toledo.....	37
Figura 31. Serie temporal de valores acumulados de variables del balance hídrico (mm), en uva pisquera de los cuarteles Toledo.....	37
Figura 32. Evaluación de las estimaciones de kcb, ke y Kc obtenidas a partir de datos satelitales, utilizando los resultados obtenidos por el modelo HYDRUS-1D para los dos cuarteles de uva pisquera.	38
Figura 33. Dinámica temporal de la estimación del Kcb, Ke y Kc a partir de datos satelitales y mediante el modelo HYDRUS-1D para los dos cuarteles de uva pisquera.	39
Figura 34. Serie temporal de Ke media de cada cuartel, con puntos el día de dato satelital	

y con barras los riegos de cada cuartel.....	40
Figura 35. Serie temporal de Kcb media de cada cuartel. Con puntos se muestra el día de dato satelital y con barras los riegos de cada cuartel.	40
Figura 36. Evaluación de las estimaciones de kcbmax, kemax y KC obtenidas a partir de datos satelitales, utilizando los resultados obtenidos por el modelo HYDRUS-1D.	41
Figura 37. Cartografía del coeficiente de cultivo (Kc) a partir de imágenes satelitales para inicio, pleno desarrollo y senescencia en el predio de uva pisquera.	42
Figura 38. Se observan los datos sin corrección (naranja) y corregidos (azul) obtenidos con la ecuación 43. En el eje x están los 64 sensores y en el eje y la radiación PAR.....	62
Figura 39. Perfiles de suelo, lado izquierdo representa la variación de horizontes y el derecho porcentaje de raíz presente.	64
Figura 40. Valores de FI en olivos, mediante modelación de PAR, cuartel de Mal Paso (MP) y Mallorca (M).	67
Figura 41. Valores de IAF en olivos, mediante modelación de PAR, cuartel de Mal Paso (MP) y Mallorca (M).	68
Figura 42. Valores de FI en uva pisquera, mediante modelación de PAR, cuartel Toledo.	69
Figura 43. Valores de IAF en uva pisquera, mediante modelación de PAR, cuartel Toledo.	70
Figura 44. Dinámica temporal para olivos de las medias de Kcmax, Kcbmax y Kemax, por el método Dual FAO, cuartel de Mal Paso (MP) y Mallorca (M).....	72
Figura 45. Dinámica temporal para uva pisquera de Kc, Kcbaj y Ke, por el método Dual FAO, cuartel Toledo.....	73
Figura 46. Dinámica temporal de índices vegetacionales para olivo, mediante imágenes satelitales.	75
Figura 47. Dinámica temporal de índices vegetacionales para uva pisquera, mediante imágenes satelitales.	76

ÍNDICE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Obtención de índices de vegetación según sus ecuaciones.	14
Cuadro 2. Valores de estadígrafos respecto a datos de terreno y satelitales, para IAF y FI.	22
Cuadro 3. Valor de los estadígrafos respecto a datos de terreno y satelitales, para IAF y FI.	24
Cuadro 4. Valores de las variables del balance hídrico en olivos, cuartel Mal Paso y Mallorquina.	27
Cuadro 5. Valores de las variables del balance hídrico en uva pisquera, cuartel Toledo.	36
Cuadro 6. Ubicación geográfica de los individuos en estudio, DATUM WGS 84, Proyección UTM zona 19S.	57
Cuadro 7. Serie temporal de las mediciones en terreno con ceptómetro lineal.	57
Cuadro 8. Serie temporal de imágenes satelitales estudiadas.	58
Cuadro 9. Parámetros para el cálculo de evaporación de los cultivos en estudio.	61
Cuadro 10. Media de k modelado en el periodo de estudio para olivos.	63
Cuadro 11. Media de k modelado en el periodo de estudio para uva pisquera.	63
Cuadro 12. Resultados de Textura en cada horizonte por cuartel.	65
Cuadro 13. Valores de la curva característica de suelo, en 5 tensiones para cada cuartel.	65
Cuadro 14. Valores de las simulaciones de la Ecuación de van Genuchten-Mualem. ...	66
Cuadro 15. Valores máximos y mínimos para cada Índice Vegetacional en los cuarteles.	66
Cuadro 16. Valores de FI (%) en olivos, medidos en terreno mediante ceptómetro.	67
Cuadro 17. Valores de IAF en olivos, medidos en terreno mediante ceptómetro.	68
Cuadro 18. Valores de FI (%) en uva pisquera, medidos en terreno mediante ceptómetro.	69

Cuadro 19. Valores de IAF en uva pisquera, medidos en terreno mediante ceptómetro.	70
Cuadro 20. Valores medios de Kc, Kcb y Ke máximos, respecto a datos de terreno en los cuarteles de olivos.	71
Cuadro 21. Valores medios de Kc, Kcb y Ke máximos, respecto a datos de terreno en los cuarteles de Toledo.	73
Cuadro 22. Coeficientes de curva de ajuste, para cada índice vegetacional espectral....	74

RESUMEN

La evapotranspiración real (ET_r) en zonas áridas y semiáridas puede representar entre un 90 a 100% del uso del agua a escala de cuenca. Es por esto que, para una adecuada gestión del recurso hídrico, es fundamental conocer la distribución espacio-temporal de la ET_r de manera que permita apoyar en la toma de decisiones. Pese a las numerosas investigaciones que documentan la estimación de la ET_r, utilizando diferentes métodos y diferentes escalas espaciales, la extrapolación espacial del coeficiente de cultivo (K_c), sigue representando un desafío. El objetivo de este estudio fue desarrollar un método de cartografía de K_c en cultivos de olivo y uva pisquera del valle de Copiapó, a partir de información satelital e información de terreno y evaluar su desempeño a través de un modelo hidrológico. El método consistió en la estimación del K_c mediante la determinación del Índice de Área Foliar (IAF), a partir del índice espectral SAVIgreen, calibrado con información de IAF obtenida mediante ceptómetro lineal en terreno. Se obtuvieron cartografías de IAF de uva pisquera con un ajuste de $R^2= 0,84$, en tanto, en olivos se obtuvo un $R^2= 0,38$, lo que implica una baja confianza para la predicción de IAF, razón por la cual, no se pudo estimar K_c para este cultivo. Posteriormente, se procedió a las simulaciones dinámicas de K_c obtenidas para cada planta, a partir del modelo HYDRUS-1D, el cual entregó ET_r a escala diaria. Los valores del balance hídrico, evidenciaron un riego adecuado en olivos, sin embargo, en uva pisquera no fue eficiente al haber más de un 50% de percolación. La comparación entre los dos métodos de K_c en uva pisquera, entregó un $R^2=0,29$ evidenciando diferencias entre ambos enfoques, puesto que, uno es obtenido en forma empírica a partir únicamente de la cobertura vegetal, mientras que las estimaciones obtenidas por simulaciones del modelo HYDRUS estuvieron basadas en la resolución de balance de masa en el suelo. Se atribuyen estas diferencias al exceso de agua después de cada riego, generando condiciones de estrés para la planta, lo que no pudo ser evidenciado por el método de K_c satelital basado en la cobertura vegetal. Por otro lado, la comparación de K_c espacial y K_{cmax} de HYDRUS, presentó un $R^2=0,75$, demostrando una fuerte coherencia entre las estimaciones potenciales de ambos métodos. Los resultados apuntan a la posibilidad de obtener el consumo de agua del cultivo de uva pisquera de forma espacialmente explícita, a partir de información satelital.

Palabras clave: Evapotranspiración, Coeficiente de Cultivo, Índice Área Foliar y HYDRUS

ABSTRACT

Actual evapotranspiration (ET_r) in arid and semi-arid zones may represent between 90 and 100% of water use at basin scale. It is therefore important to identify the spatial-temporal distribution of ET for an easier decision-making and adequate management of water resource. The spatial extrapolation of the crop coefficient (K_c) still represents a challenge in spite of the number of research performed with contrasting methods and spatial scales. The aim of this study was to develop a method for mapping K_c in olive and grapevine orchards located in Copiapó Valley by using satellite information and field information, and then comparing the satellite estimation with an independent estimation of a hydrological model. The methodology consist in the estimation of K_c by the determination of the Leaf Area Index (LAI), based on the SAVIgreen spectral index, calibrated with LAI information obtained by a linear ceptometer in the field. The correlation coefficient obtained for LAI mapping in grapevine was R²=0.84, while in olive trees was R²=0.38, suggesting a low prediction of LAI, which hampers the K_c estimation. Subsequently, dynamic simulations of K_c for each plant were performed using the daily ET_r estimated by HYDRUS-1D and ET_o from a weather station. The mass balance estimated by HYDRUS 1D showed an adequate irrigation in olive trees and inefficient irrigation in grapevine with 50% of percolation. The contrast between the two methods of K_c in grapevine delivered a R²=0.29, evidencing differences between both approaches, since one of them is empirically obtained from the canopy, while HYDRUS estimations were based on the mass balance resolution of the soil profile. These differences are attributed to excess water after each irrigation, generating stress conditions for the plant, which could not be evidenced by the satellite K_c method based on the vegetation cover. On the other hand, the contrast of spatial K_c and K_{cmax} of HYDRUS presented a R²=0.75, showing a strong coherence between the potential estimates of both methods. The results suggest the possibility of obtaining the water consumption of grapevine crop in a spatially explicit way.

Keywords: Evapotranspiration, Crop Coefficient, Leaf Area Index and HYDRUS

INTRODUCCIÓN

Actualmente en Chile, la crisis hídrica se ha manifestado severamente en la zona centro-norte del país, puesto que es una zona con escasez de precipitación y una alta competencia por el recurso hídrico (Matus et al., 2004). En la zona comprendida entre Copiapó y Santiago, la problemática se ha exacerbado debido a otorgamientos indebidos de los derechos de agua de uso consuntivo, el cual se utiliza principalmente para el riego de los cultivos (Pizarro et al., 2008). Dado lo anterior, es que para estas zonas se requiere optimizar la gestión del recurso hídrico, expresado en la búsqueda de nuevas tecnologías y técnicas agronómicas para un uso más eficiente del agua (Kremer, 2013).

En la provincia de Copiapó, los cultivos con las mayores superficies en producción son las especies frutales: olivo y uva (INE, 2007). El olivo es un árbol perenne que posee una mediana tolerancia a la salinidad (Allen et al., 2006), pero en zonas áridas es común la sobreestimación de este problema lo que implica excesos de agua, evidenciando frecuentes fallas en el comportamiento productivo, por un manejo deficiente del agua (Fichet et al., 2011). La vid, en tanto, es un árbol de follaje caducifolio, y un cultivo clasificado como moderadamente sensible a la salinidad (Urdanoz y Aragüés, 2007). Estas especies frutales poseen marcadas diferencias en el hábito de foliación, por esto, resulta primordial conocer las necesidades hídricas de la planta, además de las características del suelo y del clima (Allen et al., 2006), particularmente, registrar su desarrollo en ambientes salinos donde el manejo del riego debe considerar los factores mencionados.

Una forma de caracterizar las necesidades hídricas de la planta es cuantificando su déficit hídrico, a través de la evapotranspiración del cultivo (UNESCO, 1974). La importancia de la evapotranspiración (ET) en zonas áridas y semiáridas radica en la devolución de la precipitación a la atmósfera, las cuales podrían alcanzar entre un 90% a un 100% (Antúnez y Felmer, 2009), representando uno de los principales factores de agotamiento del agua que ingresa a las cuencas (Tasumi and Allen, 2007). La estimación de la ET requiere de una serie de factores entre los que se encuentran: las propiedades físico-químicas del suelo, las condiciones atmosféricas, las características de los cultivos y la eficiencia y tipo de sistemas de riego (Allen et al., 2006), teniendo en cuenta la dimensión espacial y temporal, debido a que juega un papel importante en la gestión del recurso hídrico (Li et al., 2015).

La ET real consta de dos procesos combinados: la pérdida de agua superficial por evaporación (en el suelo desnudo) y, por otro lado, la pérdida de agua por transpiración desde los cultivos. La cuantificación de la ETr resulta difícil de obtener, además de costosa debido a los instrumentos y la frecuencia de medición requeridos, es por eso, que la estimación de la ETr ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones (Allen et al., 2006; Campos et al., 2010; Frag et al., 2012; Kool et al., 2014; Pôças et al., 2015; Ramos and Santos, 2009), destacando los modelos propuestos por FAO 56 (Allen et al., 2006). La ETr se define como el producto del agua evapotranspirada por el cultivo en función de la demanda atmosférica, expresada como ET de referencia (ET₀), y el

coeficiente de cultivo (K_c), siendo un factor de consumo de agua que ocurre en la superficie cultivada (SEPOR, 2010).

El K_c es una variable importante para la comprensión de la proporción de agua evapotranspirada por el cultivo en función de la demanda atmosférica. En lugares áridos, es necesario el conocimiento de las condiciones de riego (Orgaz et al., 2006). Las curvas de K_c proporcionan un método simple y confiable para la estimación de ET basado en variables climáticas (Allen et al., 2005). Este coeficiente puede variar según el tipo de cultivo y su etapa fenológica, aunque dichos valores están descritos para especies que se encuentran en condiciones estándar. Por el contrario, cuando se trata de cultivos no estándar, se utilizan modelos de corrección. Las variables frecuentemente utilizadas para estos modelos son: cobertura, Índice de Área Foliar y datos meteorológicos. (Allen et al., 2006). La obtención del K_c es la finalidad de este estudio, pero la mayoría de las investigaciones están enfocadas en la estimación de ET, con variados métodos, donde incluso no es necesaria la variable K_c (Subedi and Chávez, 2015)

La ET_0 se estima comúnmente mediante estaciones agrometeorológicas, mientras que, la estimación de ET real es más compleja y puede realizarse directamente por mediciones micrometeorológicas de estaciones de flujos turbulentos (Li et al.; Zhang et al, 2008), por modelos semi-empíricos (Allen et al., 2006), por modelos hidrológicos (Galleguillos et al., 2017; Kool et al., 2014) o por estimaciones basadas en modelos de balance de energía a partir de imágenes satelitales (Galleguillos et al., 2011a, Kalma et al., 2008). Entre las fuentes de teledetección más utilizadas se encuentran las imágenes satelitales Landsat, a partir de las cuales es posible estimar la ET utilizando mediciones de temperatura de superficie, para resolver el balance de energía (Jiménez-Bello et al., 2015; Maes and Steppe, 2012; Murillas y Londoño, 2014) o de manera indirecta, mediante la incorporación de índices espectrales de vegetación (Pôças et al., 2015). La principal ventaja del uso de esta herramienta, radica en la dimensión espacial que está contenida en la información satelital, la que permite generar cartografías de las variables claves que definen la ET real, como la estimación de la cobertura de suelo e Índice de Área Foliar (Gaona, 2009; Härkönen et al., 2015). Por otro lado, los modelos hidrológicos permiten caracterizar la dinámica temporal de la ET real de forma muy detallada a escala local (Kool et al., 2014). Entre los modelos hidrológicos actuales destaca HYDRUS, que viene integrado en un software que permite resolver simultáneamente la ecuación de Richards y la ecuación Advecto-Dispersiva para modelar el movimiento de agua, calor y solutos en el tiempo y espacio (Šimůnek et al., 2008). Su uso ha sido documentado con éxito en numerosas investigaciones tanto en su versión 1-D (Galleguillos et al., 2011b; Galleguillos et al., 2017; Sutanto et al., 2012; Wilmans, 2005), como en su versión 2-D (Provenzano, 2007; Salfate, 2005; Šimůnek et al., 1999).

Pese a las numerosas investigaciones que documentan la estimación de la ET, con diferentes métodos y escalas espaciales (Li et al., 2009; Liou and Kar, 2014; Rana and katerji, 2000; Zhan et al., 2015), la extrapolación espacial del parámetro K_c sigue representando un desafío, siendo el trabajo de Pôças et al. (2015) uno de los pocos referidos a olivo y uva de mesa. En este contexto, la presente investigación busca realizar una cartografía de estimación del coeficiente de cultivo ajustado (K_{caj}), utilizando un enfoque combinado de modelamiento hidrológico y percepción remota en olivares y viñas de la zona baja del Valle de Copiapó.

Esta investigación se encuentra inserta y financiada por el programa IDeA, FONDEF CONICYT, en cual el nombre del proyecto es “Modelo Dinámico de Demanda Hídrica Aplicable a la Gestión de Recursos Hídricos a Nivel de Cuenca.”

Objetivo General

Desarrollar una cartografía de coeficientes de cultivo ajustados en olivo y uva pisquera del valle de Copiapó, por medio de modelamiento hidrológico e información satelital

Objetivos Específicos

- Estimar cartografía del Índice de Área Foliar (IAF) mediante la complementación de mediciones de campo e información satelital.
- Aplicar modelo HYDRUS-1D para la estimación del parámetro K_c local, mediante simulaciones de E_{Tr} derivadas
- Estimar coeficiente de cultivo (K_c), mediante modelación satelital de Índice de Vegetación (IV).

DATOS Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Copiapó se localiza entre los paralelos 26°38' y 28°38' latitud sur, conteniendo una superficie total aproximada de 18.400 km². El valle de Copiapó presenta un clima desértico con 18 mm de precipitación media anual, concentradas en los meses de junio y julio (DGA, 2004). En la Región de Atacama, el 69,1% de los cultivos son frutales, correspondiendo un 65.3% a uva y un 20,5% a olivos en producción. En la ciudad de Copiapó, los cultivos frutales corresponden a un 87.2% de lo cultivado, siendo un 80.2% a uva y un 11.9% a olivos en producción (INE, 2007). Cabe destacar que la uva pisquera y el olivo tienen una gran importancia agrícola en la región.

Los sitios de ensayo se encuentran distribuidos en el Valle bajo del Río Copiapó, región de Atacama. El estudio contempla dos especies de cultivo en los ensayos, el primer ensayo son olivos en el predio Mallorca (27°20'12.63" S, 70°34'7.43" O) y en el predio Mal Paso (27°19'9.72" S, 70°32'20.32" O); y el segundo ensayo es de uva pisquera en el predio Toledo (27°17'52.98" S, 70°27'14.40" O), con dos cuarteles de estudio (Figura 1).

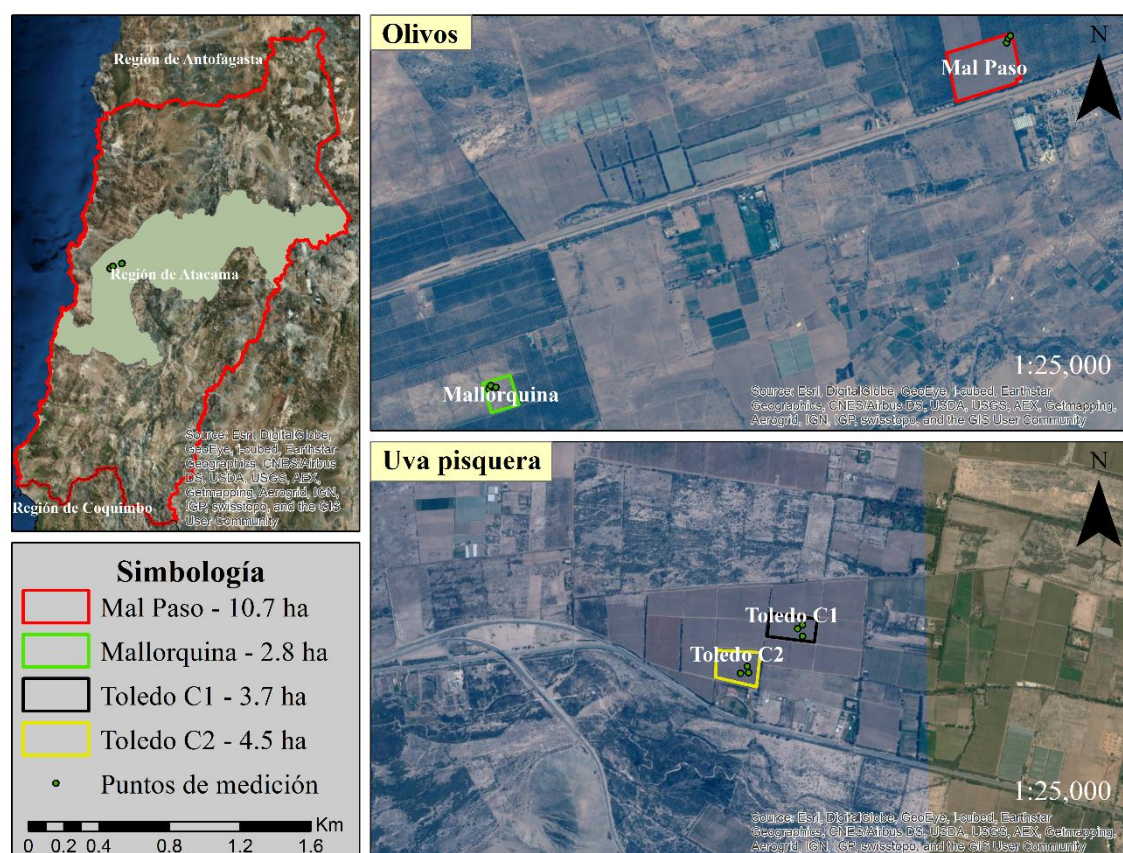


Figura 1. Cartografía de los predios, cada cuartel representado por un polígono.

Datos y materiales

El material vegetal presente en el predio Mallorquina y Mal Paso corresponde a cultivos de olivo variedad Kalamata, y en el predio Toledo a cultivos de uva pisquera variedades Moscatel Rosada y Pedro Jiménez, estos predios estaban asociados al proyecto del FONDEF CONICYT como objeto de estudio.

Se eligieron 3 individuos de olivos aleatoriamente en cada predio y 3 individuos de uva pisquera en dos cuarteles del predio Toledo de forma aleatoria, teniendo una condición de distancia de 15 metros entre ellos como mínimo, además mencionar que estas plantas no deben estar cerca de la orilla del camino, ya que esto podría afectar la representatividad productiva. La posición de cada uno fue registrada por GPS (GPSmap 62s, Garmin Ltd., Kansas, EE.UU.).

La Figura 2, presenta los lugares de medición con ceptómetro lineal. Cabe mencionar que la investigación efectuada en olivos, presentan una diferencia de edad de plantación: en el cuartel Mal Paso con plantas de 10 años y en el cuartel Mallorquina con plantas de 6 años, mientras que, en uva pisquera los dos cuarteles presentaban las mismas características etarias con 15 años. El registro etario es referencial para el periodo de estudio.



Figura 2. Mediciones con ceptómetro para estimación de PAR, a) en olivos cuartel de Mal Paso, b) en uva pisquera cuartel Toledo.

Para la Radiación Fotosintética Activa (PAR), se utilizó un Ceptómetro Lineal (SunScan SS1-STD3, Delta-T Devices Ltd., Londres, Inglaterra), como muestra la Figura 3, grillas móviles para emular el marco de plantación que comprende una superficie de 5 x 8 m en olivo y de 3 x 3 m en uva pisquera y huincha para medir.



Figura 3. Ceptómetro Lineal, SunScan SS1-STD3, Delta-T Devices Ltd.
Fuente: Delta-T Devices (2016).

Las propiedades físicas de los suelos fueron determinadas mediante análisis de laboratorio utilizando cilindros de acero inoxidable de 5 cm de alto por 6.2 cm de diámetro. Los parámetros estimados comprenden la textura, curva característica del agua en el suelo y densidad aparente.

La información satelital fue recopilada desde United States Geological Survey (USGS), a través de la página web (<http://earthexplorer.usgs.gov>), específicamente de las imágenes del sensor OLI del satélite Landsat 8, del periodo de marzo 2014 a diciembre 2015.

Adicionalmente, se recopiló información meteorológica de la red de estaciones Grupo de Estudios del Agua (GEA, Universidad de Chile), además de los datos de caudales aplicados mediante riego a los predios, del periodo de junio 2014 a marzo 2015.

Metodología

Para una mejor comprensión del diseño experimental, se realizó un diagrama, cuyos procesos se pueden diferenciar por colores. Las formas de color verde son los procesos de la modelación del PAR para obtener IAF y FI, resultados necesarios para modelación de K_c satelital (formas color amarillo) y la modelación hidrológica (formas de color naranja), los de colores celestes son formulas empiricas, y el color azul oscuro presenta el objetivo general de este estudio (Figura 4).

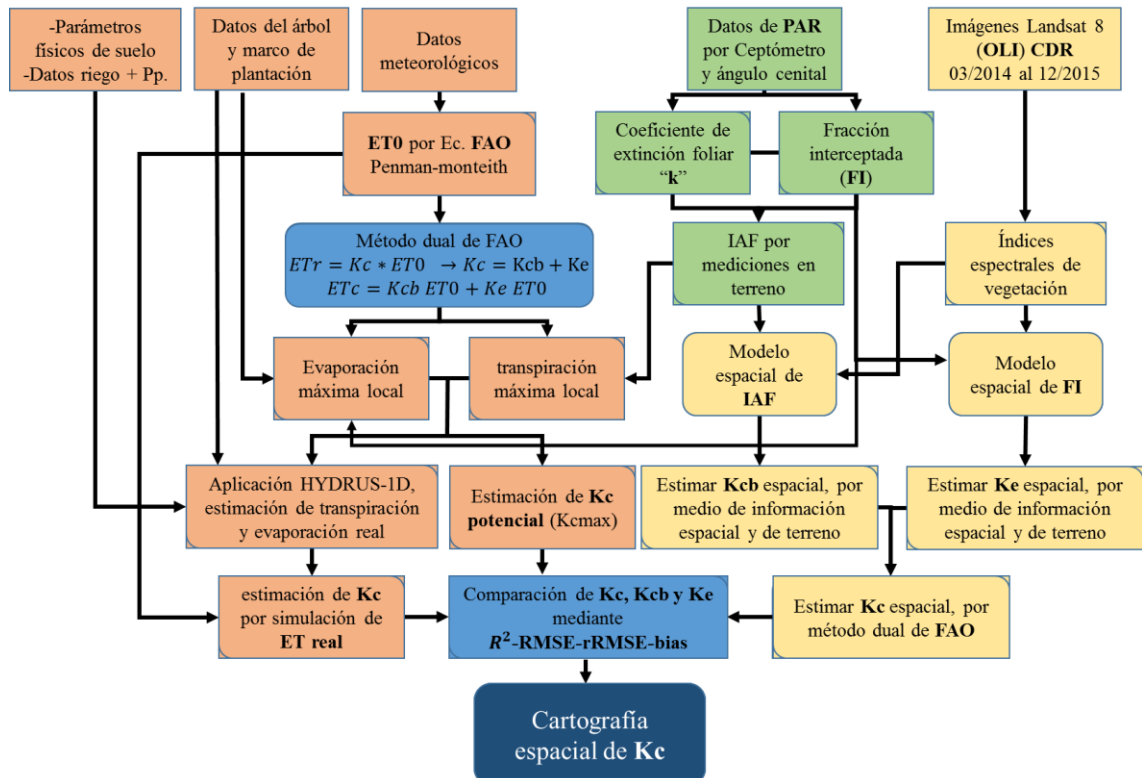


Figura 4. Esquema del diseño experimental.

Estimación de cartografía del Índice de Área Foliar (IAF) y Fracción interceptada (FI).

La estimación de IAF espacial, es generada por un método estadístico predictivo. Las variables cuantitativas son: IAF *in situ*, para el cual se usó un método indirecto con datos de PAR, y los Índices Vegetacionales (IV) utilizando imágenes satelitales. El análisis del conjunto de los estadígrafos para la correlación lineal por cada IV, permitió realizar una selección de los predictores de mayor confianza para efectuar un pronóstico de IAF y FI en el espacio.

Estimación de IAF por medio de ceptómetro. Se implementó el modelo propuesto por Jackson y Palmer (1979) (Ecuación 1) que es comúnmente utilizado para canopias discontinuas (Zamorano, 2011), como se mencionó anteriormente. (Ecuación 2)

$$T = (Tf + Tc) = Tf + (1 - Tf) * e^{\frac{-k * IAF}{1 - Tf}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{T - Tf}{1 - Tf}\right) (1 - Tf)}{-k} \quad (\text{Ec. 2})$$

Ecuaciones 1 y 2. Siendo T , la fracción total de radiación transmitida al suelo (Ecuación 6), Tf la fracción de la radiación transmitida independiente de la cubierta vegetal, k el coeficiente de extinción e Índice de Área Foliar IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

El modelo del elipsoide de Campbell (Campbell and Norman, 1989), nos permite describir la variabilidad de la radiación incidente transmitida en la canopia. Se efectuó para cada individuo en estudio la estimación del coeficiente de extinción foliar (k) (Ecuación 3), además del modelo de Lang (1987) que permite describir la variabilidad de la distribución angular solar en la canopia. Posteriormente se realizó una homogeneización del parámetro k en cada especie, a través de la media aritmética para todo el espacio temporal estudiado, con el fin de comprender la absorción de la luz que atraviesa la planta de manera general, basado en la ley de Beer-Lambert (Campbell, 1986)

$$k = \frac{(x^2 + \tan^2\theta)^{\frac{1}{2}}}{x + 1.744(x + 1.182)^{-0.733}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Ecuación 3. Donde k es el valor del coeficiente de extinción, θ es el ángulo cenital ($^\circ$), x es la relación del largo de la horizontal e y vertical del elipsoide (Ecuación 5).

El Modelo de Lang (1987) permite la estimación del IAF de una forma simple (Ecuación 4), utilizando la transmitancia del haz solar directo. El IAF se estima mediante una regresión lineal en función del ángulo cenital solar, debido a esto, el modelo representa un valor de IAF para una escala temporal acotada por la posición del sol, pero permite entender la variabilidad de la excentricidad del elipsoide de la canopia. (Ecuación 5)

$$L = 2(A + B) \quad (\text{Ec. 4})$$

$$x = \exp\left(-\frac{B}{0.4L}\right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Ecuaciones 4 y 5. Donde L es el IAF para cubierta continua ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), A y B son parámetros para el ajuste de una ecuación lineal entre la fracción solar transmitida por la canopia (τ) a distintos ángulos cenitales (θ).

La transmitancia de radiancia solar al suelo (T) se define como la fracción de radiancia solar incidente al suelo que pasa a través de una muestra (Ecuación 6), por el contrario, la Fracción Interceptada (FI), corresponde a la radiación que es interceptada por la canopia (Ecuación 7).

$$T = \frac{PARn_{i,media}}{PARO_{media}} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$FI = \frac{PARi_{media}}{PARO_{media}} = \frac{PARO_{media} - PARn_{i,media}}{PARO_{media}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Ecuaciones 6 y 7. Siendo FI la fracción interceptada para la canopia (-), $PARO_{media}$ es el promedio de los datos $PARO$, que es el PAR en suelo descubierto ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$) (Ecuación 8), $PARn_{i,media}$ es el promedio de los datos de PAR no interceptados, medidos por un ceptómetro ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$) (Ecuación 9), $PARi_{media}$ datos de PAR interceptados medidos por un ceptómetro, equivalente a la diferencia entre $PARO_{media}$ y $PARn_{i,media}$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$).

$$PARO_{media} = \frac{\sum_{i=1}^{ns} n_{(i,1)} + \sum_{i=1}^{ns} n_{(i,nm)}}{2 * ns} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$PARn_{i,media} = \frac{\sum_{j=2}^{nm-1} \sum_{i=1}^{ns} n'_{(j,i)}}{ns * (nm - 2)} \quad (\text{Ec. 9})$$

Ecuaciones 8 y 9. Donde $n_{(j,i)}$ es el $PARn_i$ medido ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$), $n'_{(j,i)}$ es el $PARn_i$ corregido respecto a $PARO$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{seg}^{-1}$), nm es el número de mediciones que se realizaron en la grilla del marco de plantación (en el caso de olivos son 90 y en uva pisquera son 41), ns representa el número de sensores que se encuentran en el ceptómetro lineal, para este caso, el SunScan SS1-STD3 registra 64 sensores.

Para la estimación de la fracción de radiación solar transmitida al suelo (Tf), se tuvo que definir un umbral de radiación con el objetivo de diferenciar la radiación solar transmitida, la interceptada por la cubierta vegetal y la que va directa al suelo. Cortés (2003, Citado por Zamorano, 2011) propone un umbral de un 80% del $PARO$ para el $PARn_i$ en la estimación de Tf en cada transecto. La contabilización de los PAR que cumplían con el umbral se efectuó por medio de la ecuación 10, la forma del conteo de sensores no interceptados inicia consecutivamente desde ambas entre-hileras hacia la hilera (Figura 5), el número de sensores no interceptados serán todos lo que superen el umbral consecutivamente, es decir, el conteo se detiene al instante que el primer sensor no supere el umbral, esto nos señala el término del suelo descubierto y el inicio de la proyección de la canopia en la superficie. (Figura 6)

$$Tf = \frac{\sum_{j=2}^{nm-1} \sum_{i=1}^{ns} [si(0,8 * PARO_{media} > n'_{(j,i)}, 1, 0)]}{ns * (nm - 2)} \quad (\text{Ec. 10})$$

Ecuación 10. Donde Tf es la fracción de radiación solar transmitida al suelo (-), PAR_{media} es el promedio entre los $PARO$ medidos, $si()$ es función lógica que comprende una condición, si es verdadero toma el valor de uno y de lo contrario valor cero.

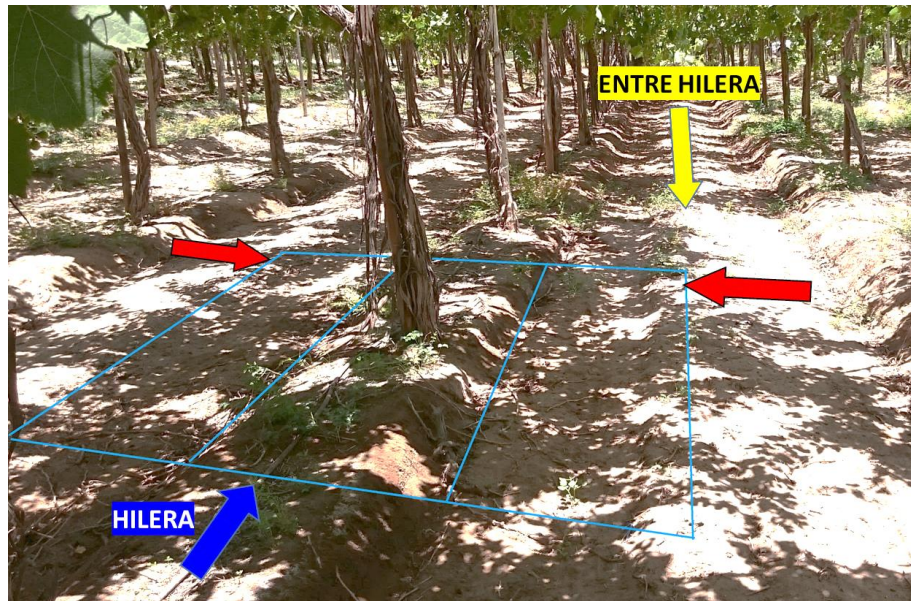


Figura 5. Representación con flechas rojas el conteo del PAR que cumplen el umbral, entre ambas hileras hacia hilera.

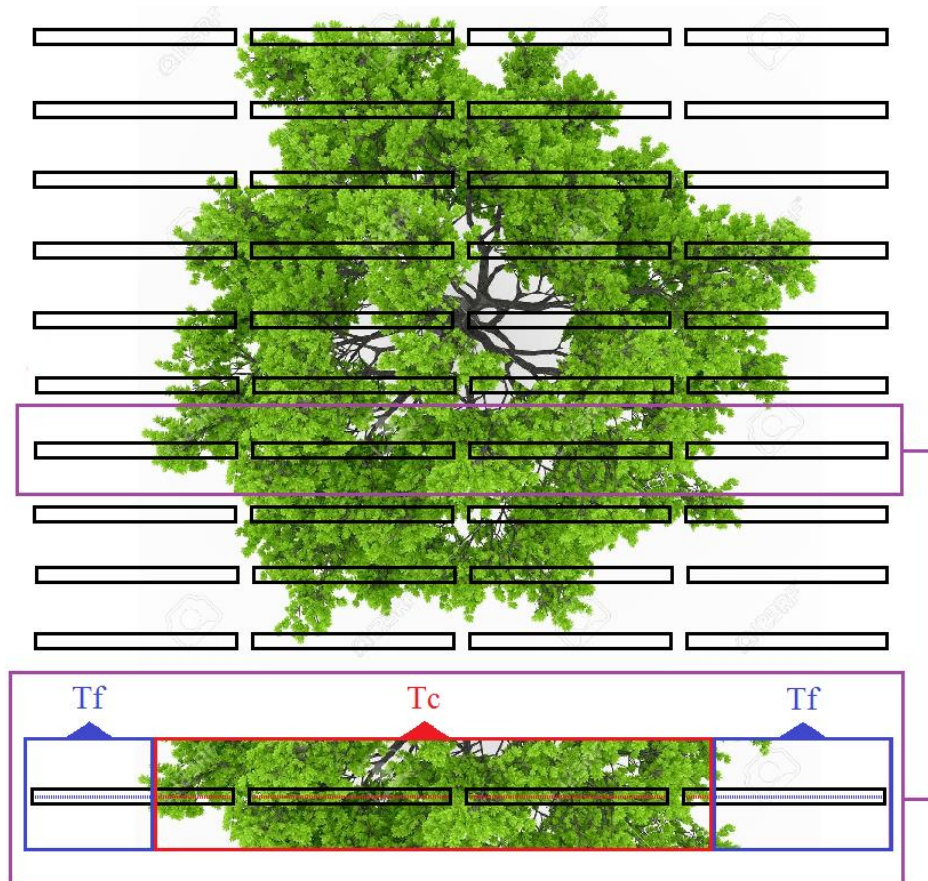


Figura 6. Representación de Tf por transecto. Los rectángulos azules representan los sensores del ceptómetro no intervenidos por la cubierta vegetal.

Las mediciones en terreno de Radiación Fotosintética Activa (*PAR*) fueron realizadas por medio de un ceptómetro lineal en tres horarios, dos horas antes del mediodía solar (*MDS-2*), al mediodía solar (*MDS*) y dos horas después del mediodía solar (*MDS+2*), siempre que el ángulo cenital fuera menor a 60° , y las condiciones climáticas despejadas (sin nubes que interfieran al sol, durante la medición) o completamente nubladas. El transecto fue perpendicular a la hilera de plantación y cada uno de ellos tiene una separación que dependerá del largo de la barra de medición del ceptómetro (1 m), estas mediciones están delimitadas por una grilla de cuerdas de características mencionadas anteriormente, lo que se debe al marco de plantación de los cultivos de la zona en olivos (Figura 7a) y en uva pisquera (Figura 7b). Cada postura dentro del transecto se realizó a intervalos de 0,5 m en olivos y 0,25 m en uva pisquera, donde la medición corresponde a la fracción de la radiación fotosintéticamente activa no interceptada por la canopia (*PAR_{ni}*). Antes y después de completado el transecto se realizó una medición en suelo descubierto (*PAR₀*), para corrección de los datos del ceptómetro (Zamorano, 2011).

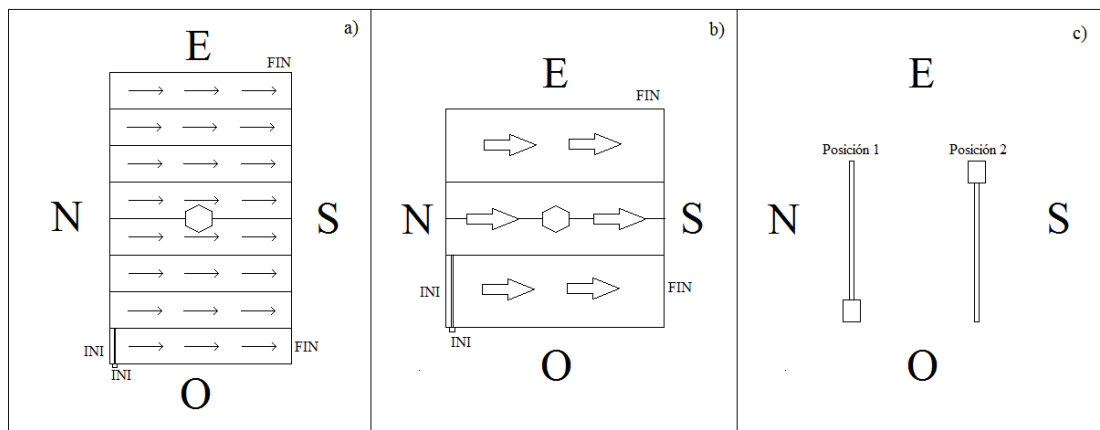


Figura 7. a) Diagrama de grilla de medición en olivo, b) Diagrama de grilla de medición en uva pisquera, c) Posición de ceptómetro.

En la Figura 7a y 7b, el hexágono en el centro representa el fuste del individuo, donde el largo del rectángulo es la entre hilera (Este-Oeste) y el ancho la sobre hilera (Norte-Sur). La barra en el lado inferior izquierdo indica la posición inicial del ceptómetro (posición noreste) terminando siempre al sureste. Cada medición comenzó al norte y terminó al sur (indicado por las flechas y por un INICIO y FIN en el norte y sur). En la Figura 7c, se indica la orientación del ceptómetro dentro del día para evitar auto sombreado del mismo.

Estimación de índices vegetacionales por sensores remotos. Se obtuvieron imágenes satelitales del sensor *OLI* del Landsat 8 High Level data product, las que fueron solicitadas de los Archivos de Landsat 8 CDR de la Plataforma EarthExplorer con un *Path* 001 y un *Row* 079. Este tipo de imágenes presentan la Reflectancia de superficie, es decir, se encuentran corregidas radiométrica y atmosféricamente por el algoritmo L8SR, siendo necesario aplicar un factor de corrección por pixel (0,0001), para obtener las imágenes dentro de los rangos validos de reflectancia (USGS, 2015). Es necesario indicar que para este estudio no se realizó una corrección topográfica, ya que el sector de los ensayos cuenta con pendientes despreciables.

Para mejorar la resolución espacial de las imágenes Landsat 8 en el espectro visible, se realizó una fusión de imágenes, es decir, se combinó información de las bandas del espectro visible con la banda del Pancromático, para disminuir el tamaño del pixel cuadrado de 30 m a 15 m, a través de un algoritmo algebraico, el método de Gram-Schmidt (Cánovas y Alonso, 2014).

Para un posterior análisis de confiabilidad del modelo se estimaron variados Índices de vegetación (IV), los que se encuentran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Obtención de índices de vegetación según sus ecuaciones.

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Ec. 11)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse et al. (1974)
Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Ec. 12)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} (1 + L)$	Huete (1988)
NDVIgreen (Ec. 13)	$\frac{Green - Red}{Green + Red}$	Gitelson et al. (2002)
SAVIgreen (Ec. 14)	$\frac{Green - Red}{Green + Red + L} (1 + L)$	Li et al. (2010)

Ecuaciones 11, 12, 13 y 14. Donde los valores de cada banda corresponden a la reflectancia del sensor OLI, Landsat 8, *NIR* infrarrojo cercano (0,851 – 0,879 μm), *Red* visible rojo (0,636 – 0,673 μm), *Green* visible verde (0,533 – 0,590 μm), y el parámetro *L* es un coeficiente de ajuste para línea de vegetación-suelo al origen (0,5). (Huete, 1988)

Estimación de cartografías de Índice de Área Foliar (IAF) y Fracción Interceptada (FI). Para la estimación del *IAF*, se realizó un modelo de regresión exponencial, relacionando los datos obtenidos de *IAF* por ceptómetro con los Índices Vegetacionales obtenidos por sensores remotos. Se realiza de esta manera debido a que, teóricamente, la relación entre el *IAF* y *IV* es de carácter exponencial, según la ley de Beer-Lambert (Jones and Vaughan, 2010). Adicionalmente para la obtención de los parámetros estadísticos de confiabilidad, fue necesario una linealización exponencial al modelo (ecuación 15), debido a que disminuye la complejidad de la manipulación de los datos, para la obtención de los estadígrafos.

$$y = a * e^{bx} \cong \ln(y) = \ln(a) + bx \quad (\text{Ec. 15})$$

Ecuación 15. Donde *y* es la variable dependiente (datos ceptómetro), *x* variable independiente (índices vegetacionales), *a* y *b* son parámetros de ajuste, variables constantes.

Para la estimación del modelo espacial de *FI* se realizó una regresión de carácter lineal entre los datos obtenidos de *FI* por ceptómetro y los Índices Vegetacionales, además se obtuvieron los parámetros estadísticos de confiabilidad.

Estimación de K_c , mediante simulaciones de Evapotranspiración real por medio de HYDRUS-1D.

HYDRUS 1-D es un software que resuelve las ecuaciones de Richards y convección-dispersión, para la estimación de transferencias hídricas, calor y solutos, en medios porosos no saturados, parcialmente saturados y completamente saturados. Este programa fue desarrollado por los investigadores: J. Šimůnek, M. Šejna and M. Th. Van Genuchten (Šimůnek et al., 1998)

HYDRUS estima la transferencia hídrica, considerando como entradas del sistema al riego más precipitaciones, y las salidas del sistema: transpiración del cultivo, evaporación y percolación del agua; siendo la E_{Tr} la suma de Evaporación y Transpiración. De acuerdo a estos antecedentes, es posible la estimación del K_c real, basado en la ecuación 16, ya que es la razón entre ET_0 y el E_{Tr} , por lo que se requiere la estimación del ET_0 a escala diaria, mediante la Ecuación de FAO Penman-Monteith (ecuación 16) (Allen et al., 2006).

$$Kc_{real} = \frac{E_{Tr}}{ET_0} \quad (\text{Ec. 16})$$

Ecuación 16. Siendo, E_{Tr} la evapotranspiración de cultivo real, ET_0 la evapotranspiración de referencia y Kc_{real} el coeficiente cultivo (-).

Para el cálculo de ET_0 con datos meteorológicos locales, se utilizó la ecuación 17, que requiere conocer la magnitud del flujo diario de calor del suelo (G), este valor es pequeño en comparación a la Radiación neta (R_n), para periodos diarios, G es relativamente ínfimo debajo de la superficie, por lo tanto, es posible despreciar este valor, como lo señala Allen et al. (2006)

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Ec. 17})$$

Ecuación 17. Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa), e_a la presión real de vapor (kPa), $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor (kPa), Δ la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Para la estimación del ET real se realizaron simulaciones diarias con el modelo HYDRUS-1D. Este modelo estimó el flujo de agua variablemente saturado por medio de

la ecuación de Richards (1931, citado por Pachepsky et al., 2003; Ramos et al., 2011) (ecuación 18)

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(z) \quad (\text{Ec. 18})$$

Ecuación 18. Donde θ es el contenido volumétrico de agua ($L^3 L^{-3}$), h es el valor de la tensión del agua en el suelo (L), t es el tiempo (T), K es la conductividad hidráulica ($L T^{-1}$), S es el consumo de agua por las plantas ($L^3 L^{-3} T^{-1}$) y z es la profundidad en el suelo. (L). L y T representan distancia y tiempo en unidades especificadas por el usuario.

La relación entre contenido de agua y tensión de agua en el suelo $\theta(h)$ requiere ser conocida previamente para resolver la ecuación diferencial de Richards. Esta relación se conoce como curva característica de agua en el suelo y comúnmente en ciencias agronómicas es ajustada por medio de la ecuación de van Genuchten-Mualem (Ec.21), debido a que caracteriza con mayor detalle la zona entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

El cálculo de $K(h)$ en el tiempo, se obtiene por medio de la ecuación 19, por lo que se requiere de la saturación efectiva (Se) (ecuación 20).

$$K(h) = K_s Se^l (1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (\text{Ec. 19})$$

$$Se(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{Ec. 20})$$

Ecuaciones 19 y 20. Donde θ_r y θ_s es el contenido de agua residual y saturado ($L^3 L^{-3}$) respectivamente, K_s es la conductividad hidráulica saturada, l es el parámetro de conectividad de poros y m es un parámetro de ajuste presente en la ecuación de van Genuchten-Mualem. (Ecuación 21)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 21})$$

Ecuación 21. h es el contenido de aire entrante (L), θ_r y θ_s es el contenido de agua residual y saturado ($L^3 L^{-3}$), α , m , n son parámetros empíricos ($1/L$), $(-)$, $(-)$ respectivamente.

La parametrización básica de HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2013) para estimar el flujo de agua requiere de:

1. Caracterización del suelo (descripción del perfil de suelo, textura, densidad aparente curvas características)
 - 1.1. Para la caracterización general de los perfiles de suelo se requirió la confección de una calicata en cada predio, donde se midió la profundidad y distribución de las raíces por cada horizonte registrado, realizado bajo criterio experto. En cada

horizonte registrado de cada calicata, se extrajo una muestra representativa, además de una muestra no alterada (cilindro de acero inoxidable de 5 cm de altura por 6,2 cm de diámetro),

- 1.2. La conductividad hidráulica saturada fue estimada por funciones de pedotransferencia (FPT) con el programa ROSETTA de HYDRUS (Šimůnek et al., 2013), por lo que se midió el tamaño de partículas (textura), a través del método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1951) y la densidad aparente, por el método del cilindro de volumen conocido. (Hernández, 2007; Sandoval et al., 2012), muestras analizadas en el laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile,
 - 1.3. Las curvas características de un perfil de suelo se realizaron para cada calicata por sus horizontes. Se determinó la retención de agua en 5 tensiones con la metodología de plato y olla a presión (Dane y Hopmans, 2002), estos valores son input para el software RETC que se rige por la ecuación 21, de van Genuchten-Mualem (van Genuchten et al., 1991). Obteniendo como resultados, el contenido de agua residual (θ_r) y saturado (θ_s) ($L^3 L^{-3}$). El K_s es la conductividad hidráulica saturada, l es el parámetro de conectividad de poros. Estas muestras fueron procesadas en el laboratorio de suelos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).
2. Datos hidrológicos, como la cantidad de agua que ingresa al sistema, son las precipitaciones diarias y el caudal del gotero efectivo. El riego por goteo efectivo se estimó, inicialmente, dividiendo el caudal del gotero por un área de mojamiento, que corresponde al ancho de mojamiento por la distancia entre goteros y fue medido utilizando la huincha de medir después de efectuado un riego.
 3. Los valores de la tensión a la cual la planta se estresa por la falta de agua (umbral de transpiración), utilizado en el modelo para olivo fue de -4000 cm (Rallo and Provenzano, 2013). Este valor fue obtenido de literatura debido a que no se encontraba registrado en el software. Por otra parte, el valor de tensión para uva de mesa si se encuentra documentado dentro del modelo con un valor de -8000 cm. Los valores umbrales extraídos del modelo corresponden a los obtenidos por Feddes et al. (1978).
 4. La estimación de evaporación potencial y transpiración máxima de las especies (olivo y vid), fueron realizadas en base a los modelos propuesto por Allen et al. (2006). Considerando que estos cultivos se encuentran en una zona árida y con un estrés salino, se procedió a realizar modelos acordes a estas circunstancias y sus debidas correcciones.

El modelo hidrológico obtiene la evapotranspiración real de las especies por medio de la resolución espacial y temporal del balance de masa de agua en el suelo. Por lo tanto, el modelo puede entregar información de contenido de agua (expresado como altura de agua o contenido volumétrico) a una resolución espacial de 1 mm (1000 nodos de información) y temporal de 1 segundo. Con esta información, se puede comparar la tensión de agua en el suelo de manera dinámica contra el umbral establecido para la planta. Cuando un nodo tiene una tensión mayor al umbral establecido, la transpiración de aquella planta es reducida linealmente desde la transpiración máxima entregada como input. El modelo conoce la posición de las raíces de la planta debido a que aquella información es un input,

la cual se entrega como una distribución acumulada. Finalmente, al terminar el periodo de simulación, la transpiración real es obtenida como una integral de todo el perfil de suelo en cada paso de tiempo.

Estimación de coeficiente de cultivo basal y de evaporación. Los valores de K_c para cada especie, que se encuentran tabulados en Allen et al. (2006), son para cultivos completamente desarrollados y en condiciones estándar. Debido a que los cultivos de la zona de estudio no están completamente desarrollados, posiblemente por un estrés salino, fue necesario realizar una corrección a la estimación para vegetación atípica y sub-óptima. Para la diferenciación de la pérdida de agua, por parte del cultivo con respecto a la del suelo, se utilizó la ecuación 22, luego, integrando las dos ecuaciones anteriores, se obtuvo la ecuación 23.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (\text{Ec. 22})$$

$$ET_c = K_{cb} ET_0 + K_e ET_0 \quad (\text{Ec. 23})$$

Ecuaciones 22 y 23. Siendo K_{cb} el coeficiente basal de cultivo (-) y K_e el coeficiente de evaporación (-).

El K_{cb} representa el componente de la transpiración en la ET_c , además, el $K_{cb} ET_0$ incluye la evaporación residual producida por el agua del suelo (debajo de la superficie) y el K_e representa al componente de la evaporación del suelo descubierto superficial. (Allen et al., 2006)

Dado que la estimación de K_e depende de la humedad disponible en el suelo, el valor utilizado es referencial, asumiéndose que la superficie expuesta del suelo dispone constantemente de humedad, con un coeficiente adimensional de reducción de la evaporación del suelo (K_r) igual a 1, es decir, no existe un gradiente de reducción de la evaporación. Por medio de la ecuación 24 se obtuvo el K_e , donde se requirieron datos meteorológicos, datos del marco de plantación y la altura de los individuos. (Allen et al., 2006)

$$K_e = \min(K_r(K_{cmax} - K_{cb}), f_{ew} * K_{cmax}) \quad (\text{Ec. 24})$$

Ecuación 24. K_{cmax} es el valor máximo de K_c después de un riego o lluvia (-) y f_{ew} es la fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido (-).

Los valores del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) son específicos para cada especie en su respectiva etapa fenológica, no obstante, los lugares de muestreo presentaron una vegetación atípica y sub-óptima, es por esto que se realizó un ajuste al K_{cb} cuando no presentaba condiciones no estándares, estimando el coeficiente de cultivo basal ajustado (K_{cbaj}) mediante la ecuación 25 (Allen et al., 2006). Para esto, es necesario conocer el valor del Índice de Área Foliar (IAF) y Fracción Interceptada (FI) en cada canopia, estos índices se estimaron mediante un método indirecto, por medio de modelación de PAR. La medición en terreno del PAR para cada canopia, se realizó mediante un registro de PAR de referencia (PAR_0) en suelo descubierto, previo y posterior a la medición de PAR real (PAR_r) en la grilla de cada árbol.

$$Kcbaj = Kcmin + (Kcbfull - Kcmin)(1 - \exp(-0,7 IAF)) \quad (\text{Ec. 25})$$

Ecuación 25. Donde, $Kcbaj$ es el valor del coeficiente de cultivo ajustado para densidad entre plantas o IAF menor a las de cobertura completa, $Kcbfull$ es el valor de Kcb corregido para condiciones climáticas no estándar, $Kcmin$ es el valor mínimo de Kc para suelo descubierto e IAF ($m^2 m^{-2}$).

Estimación de Kc espacial, por medio de información satelital

Se estimó el coeficiente de cultivo basal y de evaporación a nivel espacial, basado en el método dual de FAO, ecuación 2.

Estimación del coeficiente de cultivo basal espacial mediante Índice de Vegetación. Basado en el método propuesto por Pôças et al. (2015), se pudieron obtener cartografías de Kcb , integrando la densidad de los cultivos (ecuación 26).

$$Kcb IV = Kc min + Kd \left(\frac{IV i - IV min}{IV max - IV min} \right) \quad (\text{Ec. 26})$$

Ecuación 26. Donde $Kcb IV$ corresponde al coeficiente de cultivo basal respecto al Índice de Vegetación (IV), $IV i$ es el dato específico de IV y el píxel, $IV max$ y $IV min$ son los valores máximos y mínimos (Suelo descubierto) de IV respectivamente, el Kd corresponde al valor del coeficiente de densidad para la especie y el $Kc min$ es el valor del coeficiente de cultivo mínimo, el que, según los datos tabulados, varía entre 0.15-0.20 (Allen et al., 2006)

Para estimar el coeficiente de cultivo basal espacial se requiere del parámetro Kd , se puede explicar por el aumento del Kc , respecto a la cantidad de vegetación. El Kd depende de la fracción intersectada o IAF , debido a los efectos de la radiación al suelo y la altura de la vegetación expuesta. Esta variable se estimó con la ecuación 27. (Allen and Pereira, 2009)

$$Kd = (1 - e^{[-0.7*IAF]}) \quad (\text{Ec. 27})$$

Ecuación 27. Donde Kd corresponde al valor del coeficiente de densidad para la especie e IAF es el Índice de Área Foliar.

Estimación del coeficiente de evaporación espacial mediante Índice de Vegetación. Se implementó el método propuesto por Allen et al. (2006) en la ecuación 24. Dicha ecuación necesita conocer la fracción expuesta y humedecida del suelo (few), la que depende del proceso de humedecimiento de la superficie del suelo. Para este estudio los cultivos son regados por goteo, y la mayor superficie humedecida está cubierta por la vegetación, generando que la pérdida de agua por evaporación se vea reducida. Allen et al. (2006) propone la estimación de few por medio de la ecuación 28 y un valor constante para fw de 0,3(-) para el caso de riego por goteo.

$$few = fw * \left[1 - \frac{2}{3} FI \right] \quad (\text{Ec. 28})$$

Ecuación 28. Donde fw es la fracción de superficie del suelo humedecida por riego (-), FI es la fracción interceptado por la canopia (-).

Evaluación de cartografía de Kc para olivo y uva pisquera.

Las cartografías de Kc en cada cultivo, está basada en la estimación de Kcb y Ke con modelación de imágenes satelitales. La validación se realizó con una comparación de métodos, cuyas variables comparadas fueron: Kc , Kcb y Ke , tanto por modelación espacial, como por modelación de transferencia hídrica.

Se realizó una comparación entre los resultados de Kc de imágenes satelitales y el Kc real obtenido de la modelación HYDRUS-1D, por medio de una regresión lineal simple, así evaluar y validar la confiabilidad de los datos obtenidos por la extrapolación espacial, respecto a los parámetros estadísticos obtenidos.

Para determinar la confianza de la extrapolación espacial de Kc , Kcb y Ke para cada cultivo, se evaluó el conjunto de los estadígrafos, que son: coeficiente de determinación (R^2), $RMSE$, $nRMSE$ y $Bias$ (Lopatin et al., 2016).

El $Bias$ (sesgo) de la predicción se mide como (uno) menos la pendiente de una regresión sin intersección de la predicha frente a los valores observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{n}} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} * 100 \quad (\text{Ec. 30})$$

Ecuaciones 29 y 30. Donde, y_k es el valor relativo a estimar, \hat{y}_k corresponde a los valores de la variable dependiente, que se calcula para n que es el total de los datos (Lindberg et al., 2013)

RESULTADOS

Estimación del Índice de Área Foliar (IAF) y Fracción Interceptada (FI) por medio de técnicas satelitales

Olivos

Los resultados de la estimación de IAF y FI en olivos, mostraron una gran variación entre los arboles medidos en terreno, además no presentaba un comportamiento similar a los índices espectrales en ambos cuarteles (Figura 8), lo que se puede deber a la baja cobertura de los individuos, generando el efecto *clumping*, ya que los olivos poseen una arquitectura de dosel en forma de esfera provocando una agrupación de las hojas (Nikolov y Zeller, 2006), lo que dificulta la estimación del IAF en terreno por instrumentos ópticos.

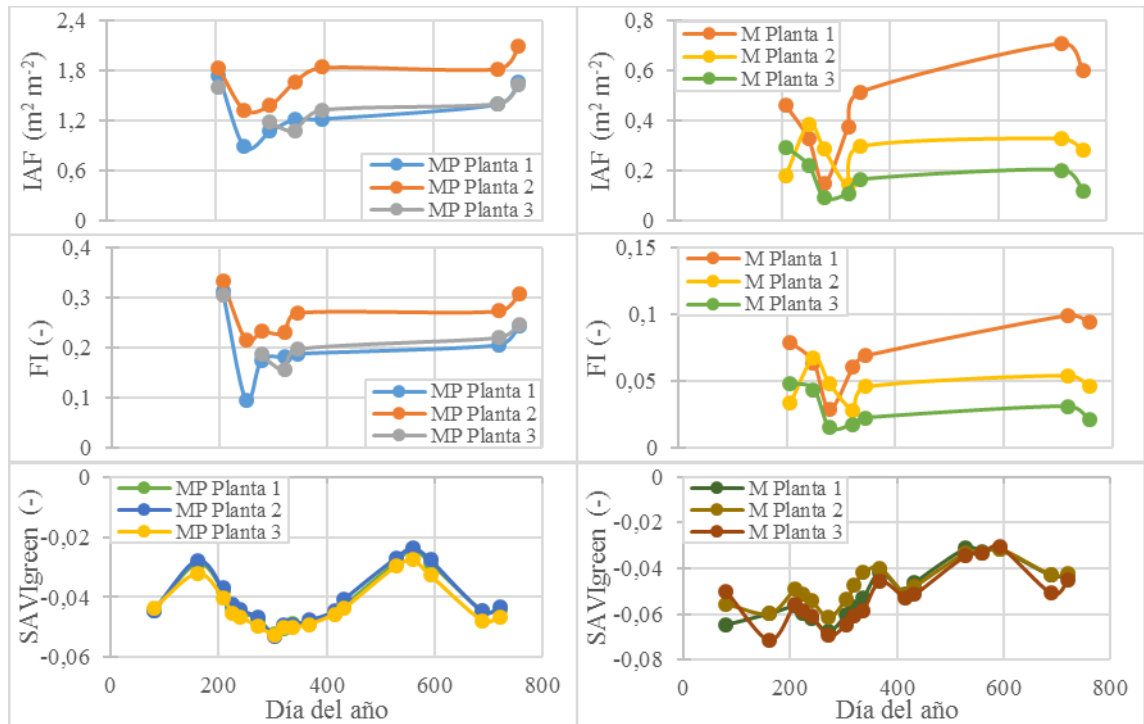


Figura 8. Dinámica temporal del Índice de Área Foliar en olivos, obtenido por medio de un ceptómetro lineal (gráfico superior, escala izquierda) y estimaciones satelitales del índice espectral SAVIgreen (gráfico inferior, escala derecha) en olivos para todo el periodo de estudio.

Cuadro 2. Valores de estadígrafos respecto a datos de terreno y satelitales, para IAF y FI.

Índice	Estadígrafos	Índices Vegetacionales			
		NDVI	SAVI	NDVIgreen	SAVIgreen
IAF	R ²	0,18	0,12	0,06	0,38
	RMSE	0,87	0,89	0,93	0,75
	nRMSE %	58,87	61,00	113,43	35,12
	Bias %	82,02	87,54	94,38	62,15
FI	R ²	0,18	0,08	0,03	0,45
	RMSE	0,09	0,10	0,10	0,07
	nRMSE %	58,73	80,58	150,56	30,55
	Bias %	81,95	92,46	96,73	55,41

Observando los resultados de Índices Vegetacionales obtenidos de imágenes satelitales, se puede evidenciar que mantienen valores homogéneos, pero presentan una importante diferencia en comparación a los datos de terreno, lo que queda reflejado en el modelo de regresión no-lineal de IAF y el modelo lineal de FI, como se puede ver en el Cuadro 2, el índice SAVIgreen es el que presenta mejores resultados en comparación con los demás, con un R² de 0,38, un BIAS de 62% y un RMSE de 0,75 para IAF (Figura 9). Respecto a FI, en general los índices tuvieron un bajo RMSE, pero un alto sesgo, destacando que el índice SAVIgreen obtuvo mejores resultados con un 0,45 de coeficiente de determinación y un 55% de BIAS (Figura 10). Producto de la baja confiabilidad de los resultados y la incerteza de los mismos, resulta poco viable realizar el modelo de IAF para la obtención de Kcb y la modelación de FI para estimar Ke, dificultando la obtención de Kc a escala espacial.

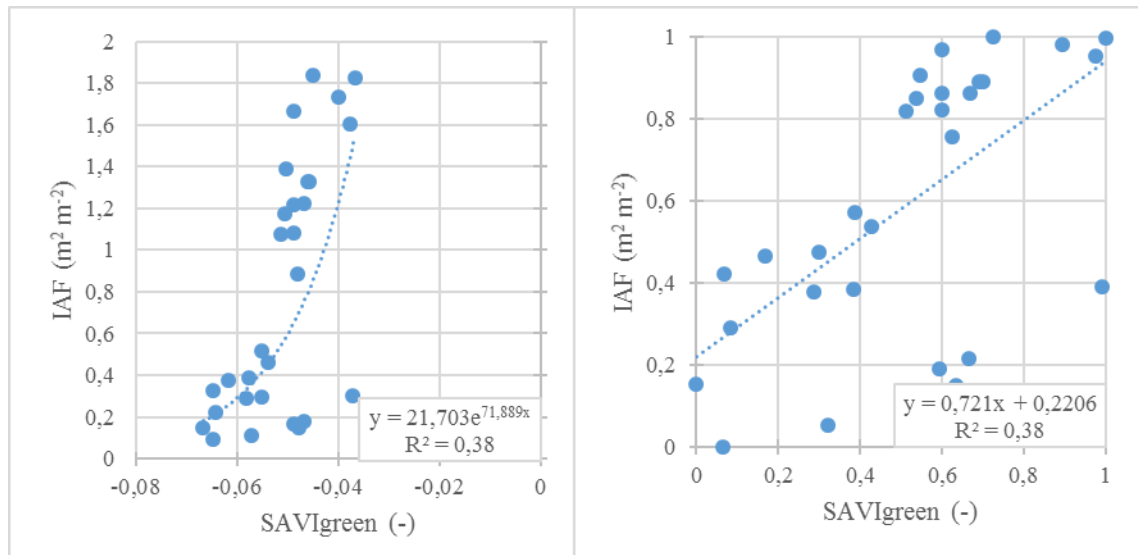


Figura 9. Curva de ajuste del Índice de Área Foliar obtenido por satélite (SAVIgreen) frente a los valores obtenidos por mediciones en terreno (IAF), curva exponencial (izquierda) y linealización logarítmica (derecha), esta última fue normalizada a una escala 0-1 para una mejor representación gráfica.

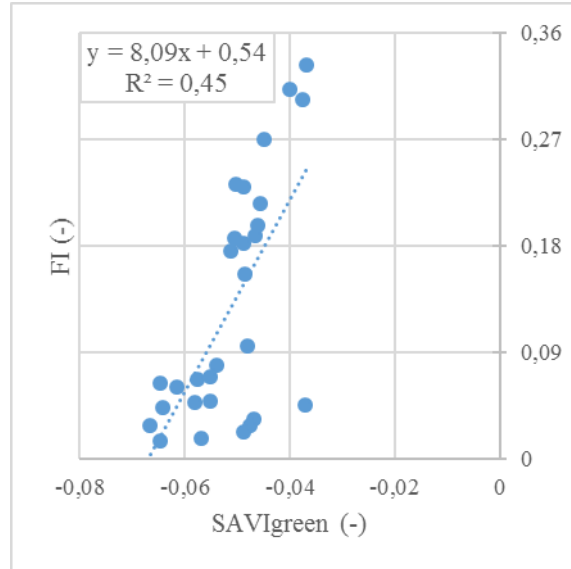


Figura 10. Curva de ajuste de FI en olivos por satélite y mediciones en terreno.

Además, cabe señalar que en ciertos periodos del año el cultivo presentó una cobertura de malezas importante, pese a los manejos de desmalezado, tal como se aprecia en las Figura 2 a), lo que genera incertezas al momento de comparar la estimación de terreno con la estimación satelital. El conjunto de incertezas frente a la estimación de IAF y FI en terreno, explican el bajo nivel de ajuste en el modelo predictivo de IAF y FI a partir de imágenes satelitales, imposibilitando la generación de cartografías de IAF, FI y de los Kc de aquí derivados.

Uva pisquera

Los resultados obtenidos por los índices espectrales en comparación a los modelos comparativos con los datos de terreno (IAF y FI), indican que el índice SAVIgreen fue el que obtuvo mejores ajustes (Cuadro 3 Cuadro 3. Valor de los estadígrafos respecto a datos de terreno y satelitales, para IAF y FI.). Esto se debe a que en este tipo de cultivo las curvas de IAF, FI y del índice espectral SAVIgreen tuvieron un comportamiento similar (Figura 11) lo que permitió obtener una regresión entre IAF-SAVIgreen y FI-SAVIgreen obtenido por satélite de forma exitosa puesto que el ajuste entre los datos fue satisfactorio, presentándose un coeficiente de determinación de 0,83 para el IAF y un 0,81 en FI, además con un sesgo (BIAS) de 16% en IAF y 19% en FI (Figura 12 y Figura 13).

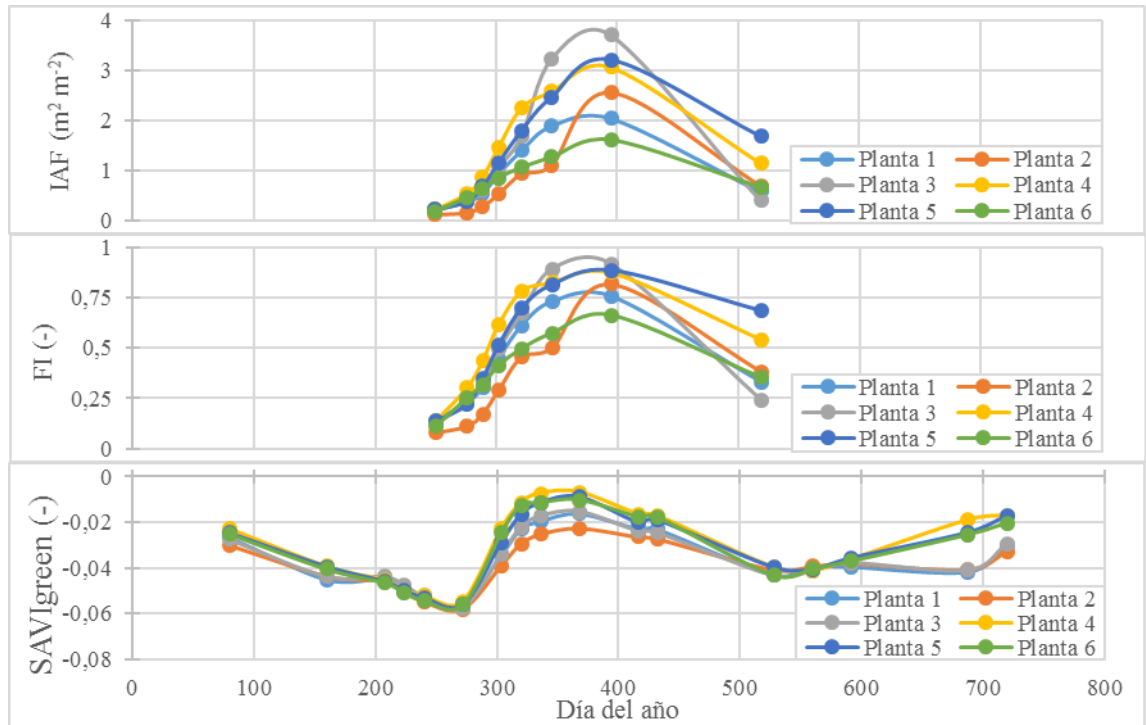


Figura 11. Dinámica temporal FI, IAF y SAVIgreen, en uva pisquera para todo el periodo de estudio.

Cuadro 3. Valor de los estadígrafos respecto a datos de terreno y satelitales, para IAF y FI.

Índice	Estadígrafos	NDVI	SAVI	NDVIgreen	SAVIgreen
IAF	R ²	0,80	0,78	0,69	0,83
	RMSE	0,40	0,42	0,49	0,36
	nRMSE %	13,99	15,42	18,61	11,47
	Bias %	20,23	22,42	31,16	16,61
FI	R ²	0,77	0,76	0,68	0,81
	RMSE	0,12	0,12	0,14	0,11
	nRMSE %	15,01	16,28	19,14	12,56
	Bias %	22,59	24,36	32,38	19,29

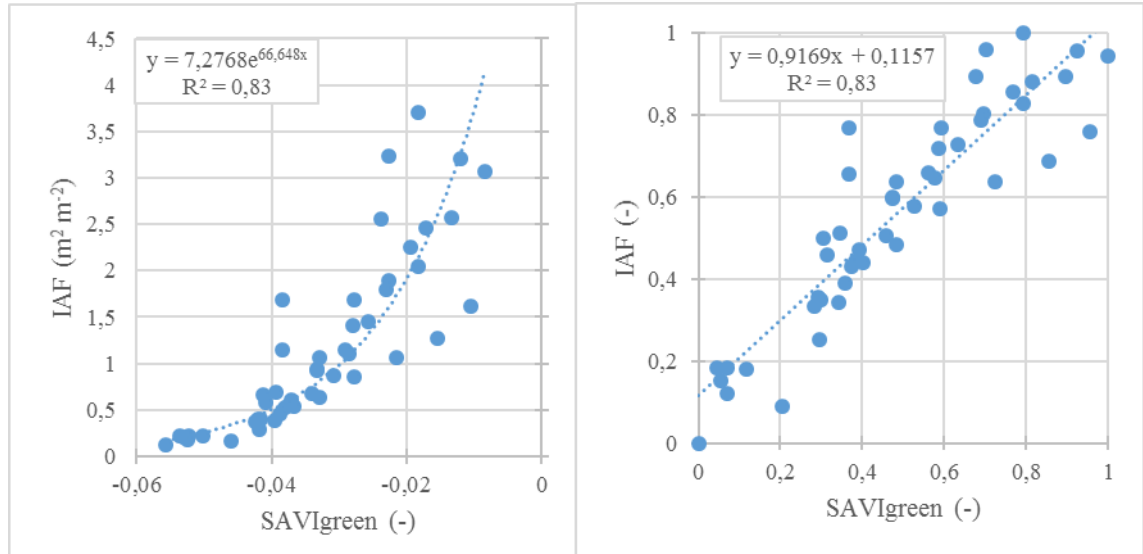


Figura 12. Curva de ajuste de IAF en uva pisquera, obtenido por satélite y mediciones en terreno (IAF), curva exponencial (izquierda) y linealización logarítmica (derecha), esta última fue normalizada a una escala 0-1 para una mejor representación gráfica.

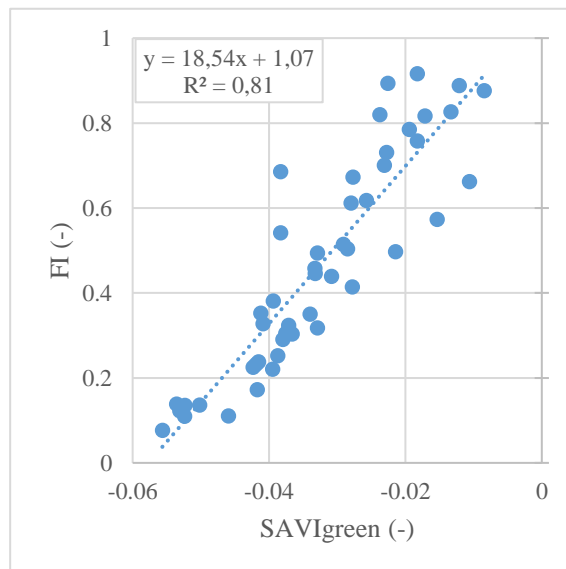


Figura 13. Curva de ajuste de FI en uva pisquera, por satélite y mediciones en terreno.

Esta relación permitió generar una cartografía mediante estadística predictiva del IAF para los dos cuarteles (Figura 14). En la cartografía se puede apreciar que existen diferencias espacio-temporales del índice, puesto que los valores varían en gran medida entre un periodo prácticamente sin hojas, hasta un periodo de cobertura máxima que se da en el mes de diciembre. A su vez, se observan zonas representadas por los píxeles de $15 \times 15 \text{ m}$ que son heterogéneas entre sí, en particular el cuartel 2 que contiene a las plantas 4, 5 y 6.

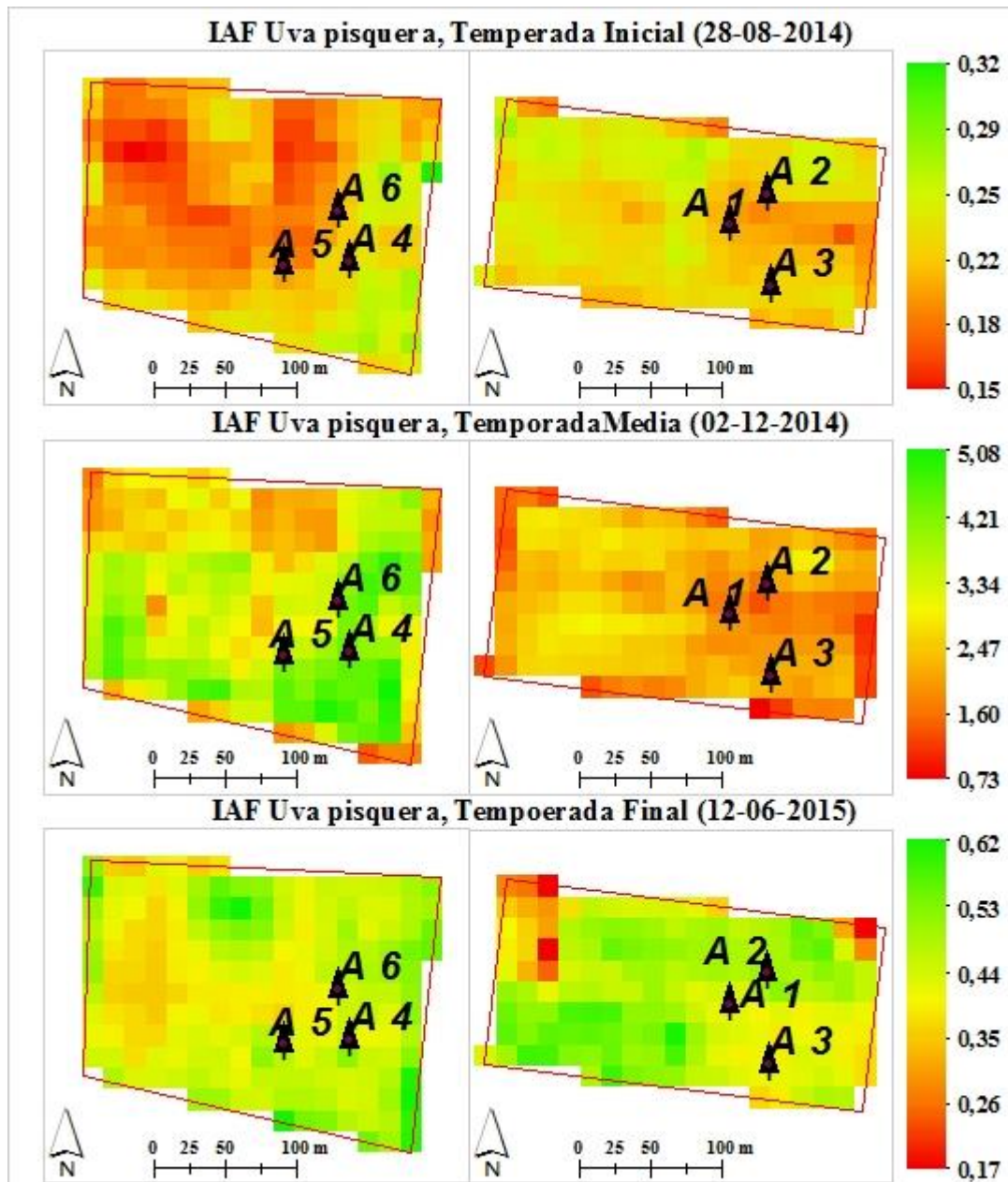


Figura 14. Cartografía del Índice de Área Foliar (IAF) a partir de imágenes satelitales para inicio, pleno desarrollo y senescencia de las plantas en el predio de uva pisquera.

Estimación del Kc y componentes del balance hidrológico, mediante modelación HYDRUS

Olivos

Las simulaciones de ETr en olivos durante un periodo de 292 días a escala diaria, permitieron conocer las componentes del balance hídrico para cada planta en cada cuartel. Los resultados de balance hídrico presentan una gran diferencia entre los cuarteles estudiados, debido a que se encontraban con distinto manejo de riego y condiciones de suelo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores de las variables del balance hídrico en olivos, cuartel Mal Paso y Mallorca.

Árbol Toledo	Entrada		Salida			Balance
	Riego	Transpiración	Evaporación	Percolación	Total	
MP Planta 1	907,03	416,09	201,65	318,28	936,02	-28,99
MP Planta 2	907,03	461,29	186,75	291,21	939,25	-32,22
MP Planta 3	907,03	423,70	199,21	313,34	936,25	-29,22
M Planta 1	988,37	359,41	230,01	281,21	870,63	117,74
M Planta 2	988,37	312,63	234,88	321,13	868,63	119,73
M Planta 3	988,37	280,65	239,10	348,11	867,85	120,52
Media MP	988,37	433,70	195,87	307,61	937,18	-30,14
Media M	907,03	317,56	234,66	316,81	869,04	119,33
Promedio	947,70	375,63	215,27	312,21	903,11	44,59

Al analizar los datos entregados por HYDRUS-1D, los resultados reflejan una variación en los valores de salidas de agua de cada cuartel. Esto se refleja en el balance hídrico, ya que difieren en los riegos, en su cantidad, duración y frecuencia (Figura 15). Se aprecia una notoria diferencia en la transpiración con un 43% en Mal Paso y un 35% en Mallorca. Esta relación se invierte en el caso de la evaporación, en Mal Paso con un 19% y el cuartel Mallorca es superior a un 25%, debido a que presenta árboles más jóvenes y más suelo descubierto. Respecto a la percolación, en ambos predios se presenta un comportamiento similar, es decir, en Mal Paso la percolación es de un 31% y en Mallorca de un 35%, estos porcentajes son con respecto al riego de cada predio.

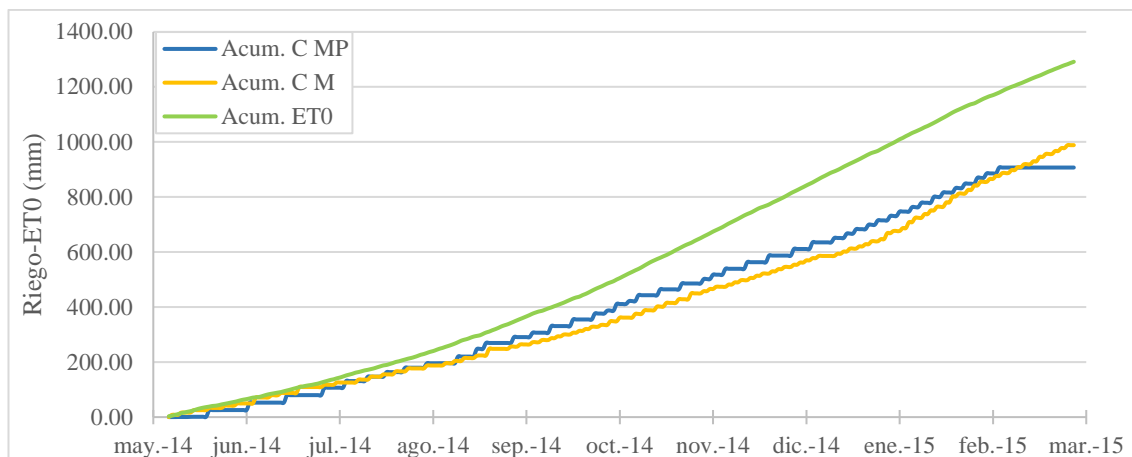


Figura 15. Serie temporal de valores acumulados en (mm) de riegos y ET0, en olivos.

Al separar los resultados por cuartel, se aprecia que el cuartel Mallorca muestra riegos de una frecuencia variada, dependiendo de las necesidades variables según la fenología de la planta. Sin embargo, se registraron eventos de riego más abundantes al promedio de los riegos en el tiempo de estudio, destacándose el mes de Febrero (Figura 16). La cantidad de agua total, aportada por riego al cultivo, fue de 988 mm durante el periodo de estudio. En los resultados finales del balance se puede ver que existe un excedente de agua por riego, lo que se podría deber al tipo de suelo presente en el cuartel Mallorca, el cual posee un alto porcentaje en limo, es decir, sobre el 40 %, y un 20% en arcillas, favoreciendo la retención de agua en el sistema, la que no se alcanza a evapotranspirar, ya que mantiene un sistema de riego controlado y presenta sales en el sistema que retienen el agua útil para las plantas.

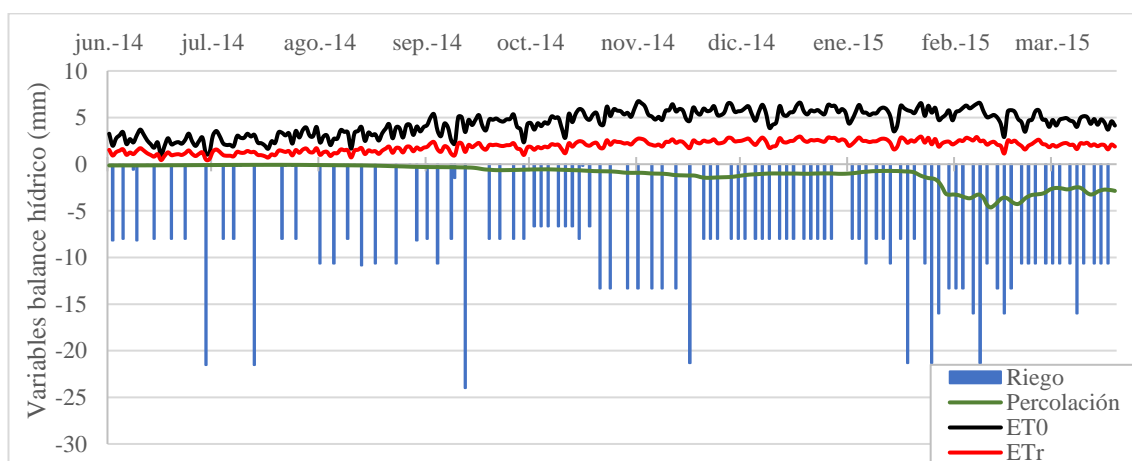


Figura 16. Variables del balance hídrico en (mm) para 3 plantas de olivo, cuartel Mallorca.

El cuartel Mal Paso presenta riegos prolongados con una baja frecuencia, invirtiéndose esta relación en la época de verano del 2015 (Figura 17). La entrada total de agua por riego fue de 907 mm en el periodo de estudio, destacando que en marzo del 2015 no se efectuaron riegos.

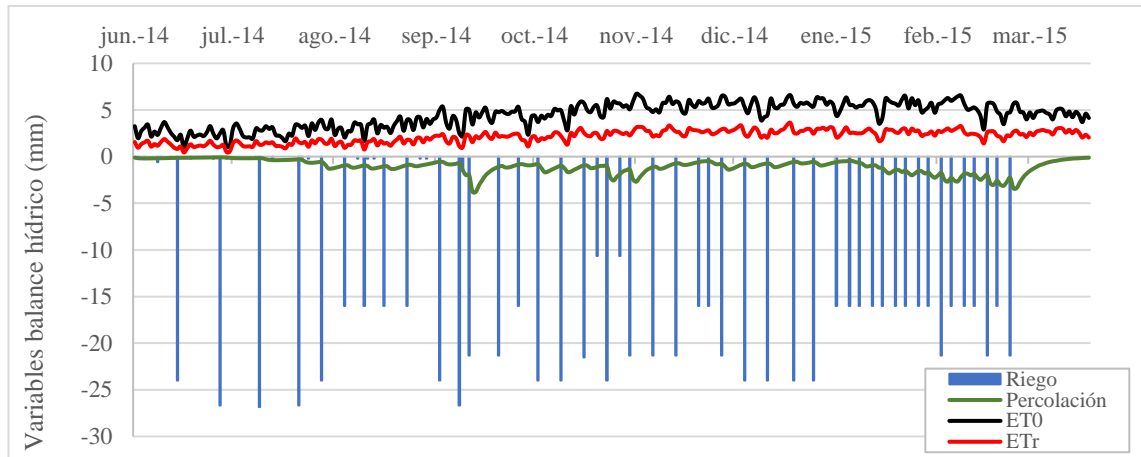


Figura 17. Variables del balance hídrico (mm) para 3 plantas de olivo, cuartel Mal Paso.

La serie temporal de K_c muestra valores de la desviación estándar importantes demostrando la variabilidad de respuesta de las transferencias hídricas entre los individuos, no obstante, se identifica un comportamiento estable, con leves distorsiones frente a eventos de riego abundantes (Figura 18). Las transferencias hídricas presentan una mayor estabilidad frente a riegos más frecuentes, pero de menor duración. En el cuartel Mallorca, la media del K_{cb} presenta leves caídas en eventos de riego de larga duración, debido a que el suelo se encuentra saturado y por ende la planta no es capaz de transpirar, pero en general, su transpiración fue similar al máximo medido, con un déficit de un 1,5%, en cuanto a K_e , este se mantuvo cercano al máximo, siendo inferior en un 0,6% (Figura 19).

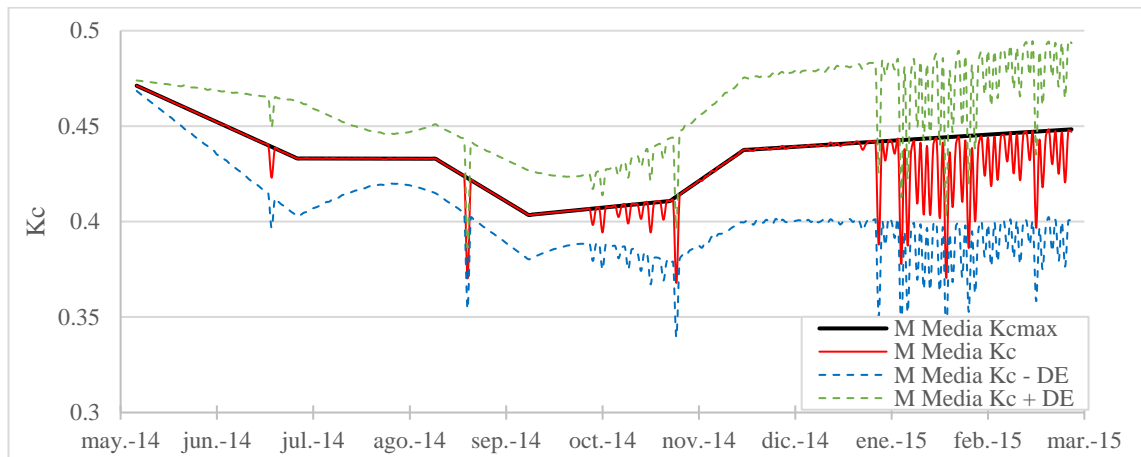


Figura 18. Serie temporal de K_c de olivos en el cuartel Mallorca.

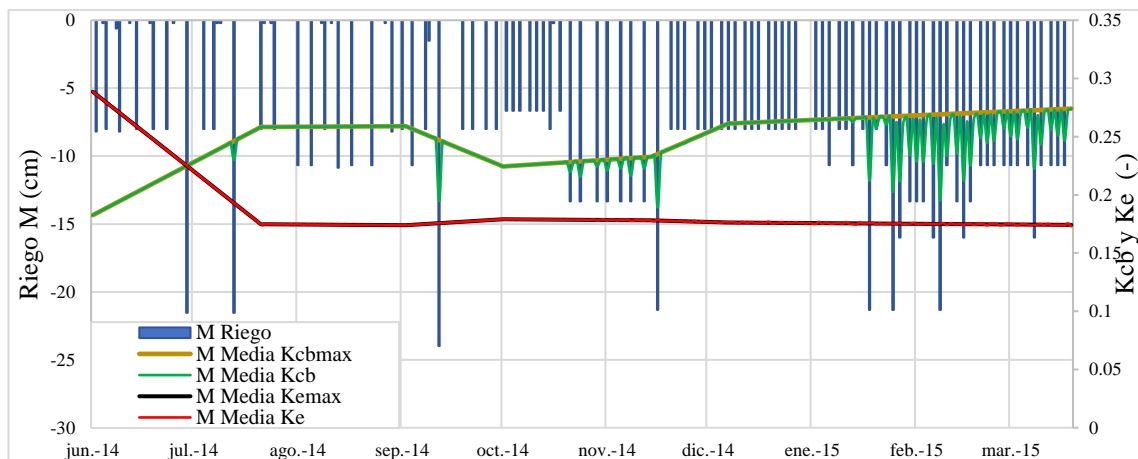


Figura 19. Serie temporal de Kcb, Kcbmax, Ke y Kemax en relación al riego del cuartel Mallorca.

Respecto al cuarte Mal Paso, también se puede observar que, en general, la dinámica de la media del Kc presenta cierta estabilidad, sin embargo, durante los meses de agosto y septiembre presenta un alza, superando el máximo medido (Figura 20). Esto se debe a que, en este periodo, la planta 3 superó el máximo de transpiración, provocando una anomalía en la media (Figura 21) en relación al Kcb, que tiene un comportamiento normal, ya que presenta disminuciones frente a cada riego. La tasa de esta caída depende de la frecuencia del riego, destacando que en marzo de 2015 se visualizó un alza producto de que no se efectuaron riegos, propiciando al aumento de la transpiración, hasta agotar el agua disponible del suelo. Respecto al Ke, en general, se encuentra a su capacidad máxima, excepto a finales del mes de marzo del 2015, donde sufre una fuerte caída, posiblemente por un agotamiento del recurso hídrico en la parte superior del perfil.

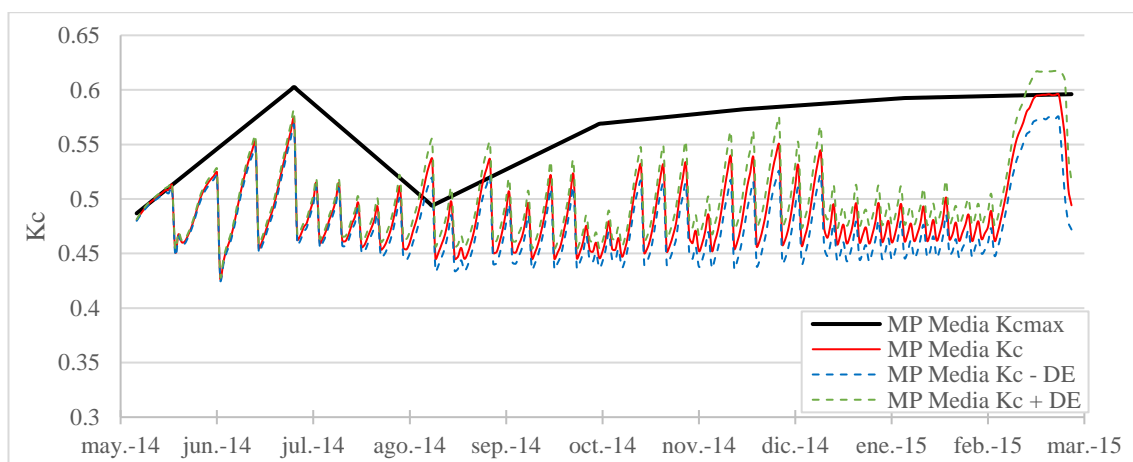


Figura 20. Serie temporal de Kc de olivos en el cuartel Mal Paso.

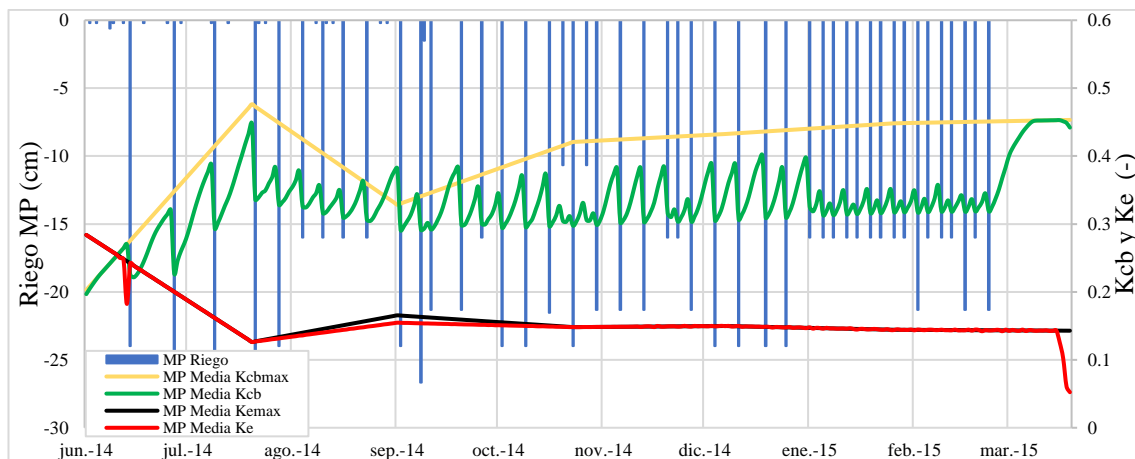


Figura 21. Serie temporal de Kcb, Kcbmax, Ke y Kemax en relación al riego del cuartel Mal Paso.

El cuartel Mallorca, al considerar las variables del balance hídrico se tiene un 60,9% de evapotranspiración y un 34,9 % de percolación con respecto al agua aplicada, evidenciando una mediana eficiencia del uso del agua de riego (Figura 22). Por otra parte, los olivos del cuartel Mallorca presentaron valores de transpiración real inferiores en un 1.8% con respecto a la transpiración potencial, lo que demuestra un uso eficiente del recurso hídrico (Figura 23).

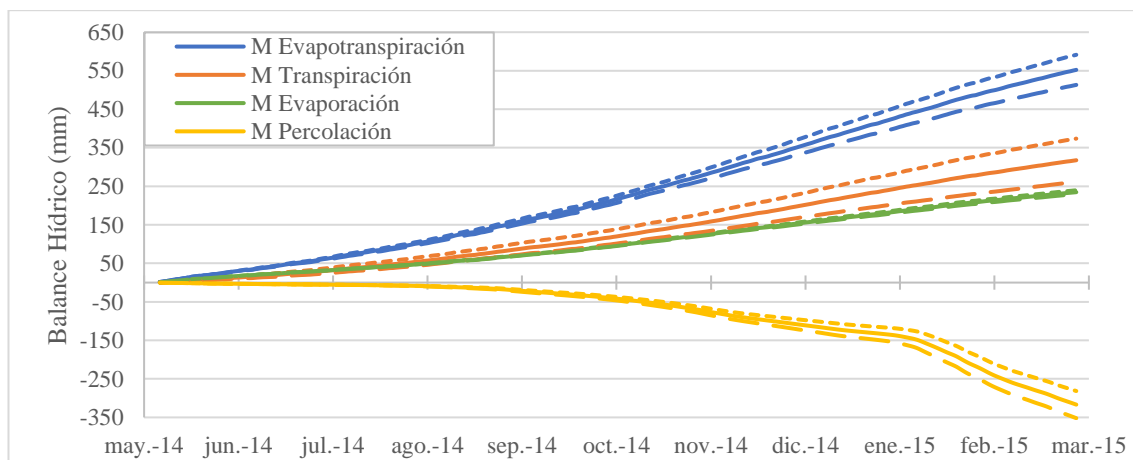


Figura 22. Serie temporal de valores acumulados de variables del balance hídrico (mm), en olivos del cuartel Mallorca.

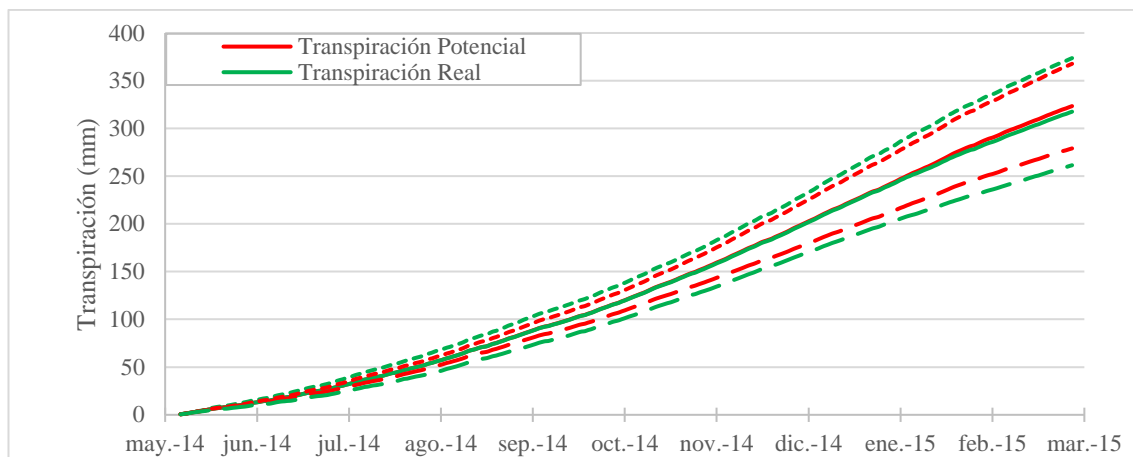


Figura 23. Serie temporal de valores acumulados de transpiración potencial y real (mm), en olivos del cuartel Mallorquina.

El cuartel de Mal Paso cuenta con árboles de mayor edad, presentando una evapotranspiración real del cultivo de un 63,7%, con respecto al agua ingresada por riego (Figura 24), además, un 31% de pérdidas del recurso es por percolación. La relación del agua transpirada frente al agua que potencialmente se podría transpirar apunta a un 18,8% de estrés hídrico (Figura 25).

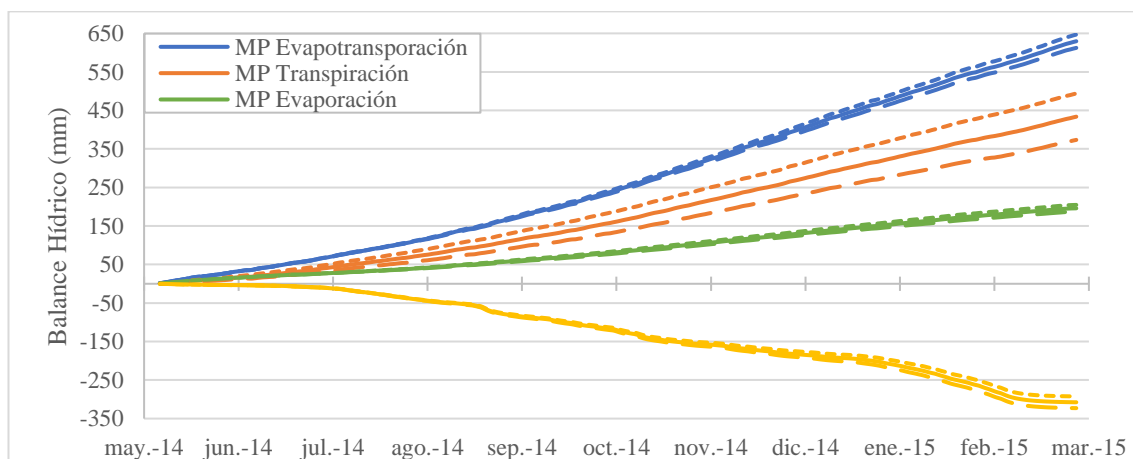


Figura 24. Serie temporal de valores acumulados de variables del balance hídrico (mm), en olivos del cuartel Mal Paso.

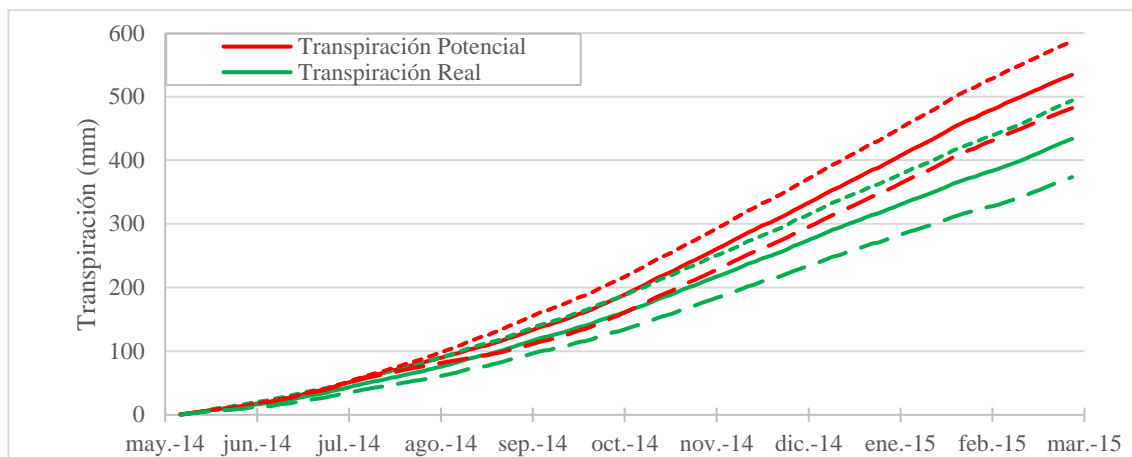


Figura 25. Serie temporal de valores acumulados de transpiración potencial y real (mm), en olivos del cuartel Mal Paso.

Uva pisquera

La modelación HYDRUS-1D permitió determinar los valores de los componentes del balance hidrológico en cada planta de uva pisquera. El ciclo temporal de las simulaciones fue de 270 días a una escala diaria, comenzando posterior a un riego (29/06/2014) y terminando el 23/03/2015, día en que ocurrió un aluvión en el valle de Copiapó. Los riegos, no muestran una gran diferencia en cantidad y frecuencia entre los cuarteles estudiados en uva pisquera, pero si difieren en la fecha de aplicación, produciendo que los procesos fenológicos generando un desfase de estos, entre los días de diferencia de aplicación en cada cuartel (Figura 26). El aporte de riego al cuartel 1 fue de 1.385 mm y en el cuartel 2 fueron 1.433 mm durante el período de estudio, como una respuesta hidrológica del cultivo marcada por los abundantes y frecuentes riegos como se puede ver en la Figura 27.

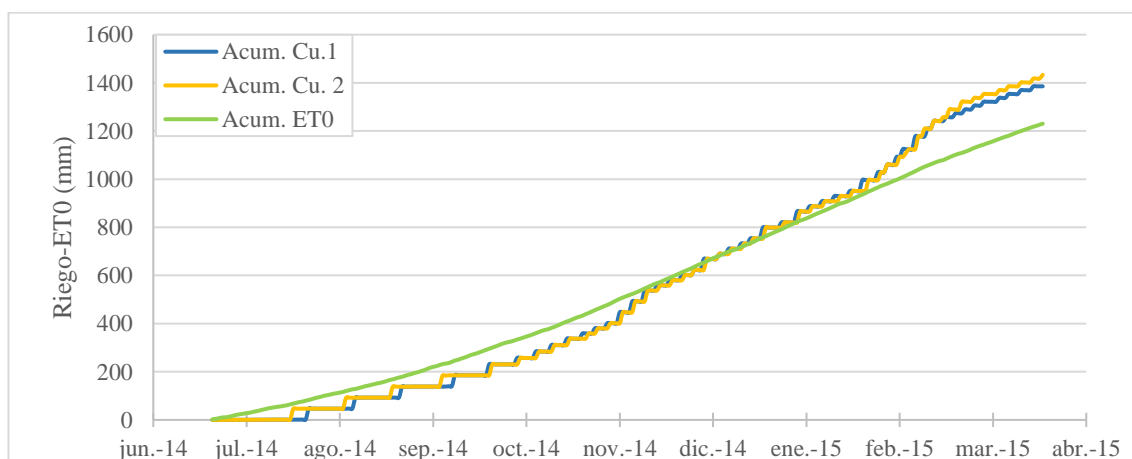


Figura 26. Serie temporal de valores acumulados de riegos (mm) y ET0 en uva pisquera.

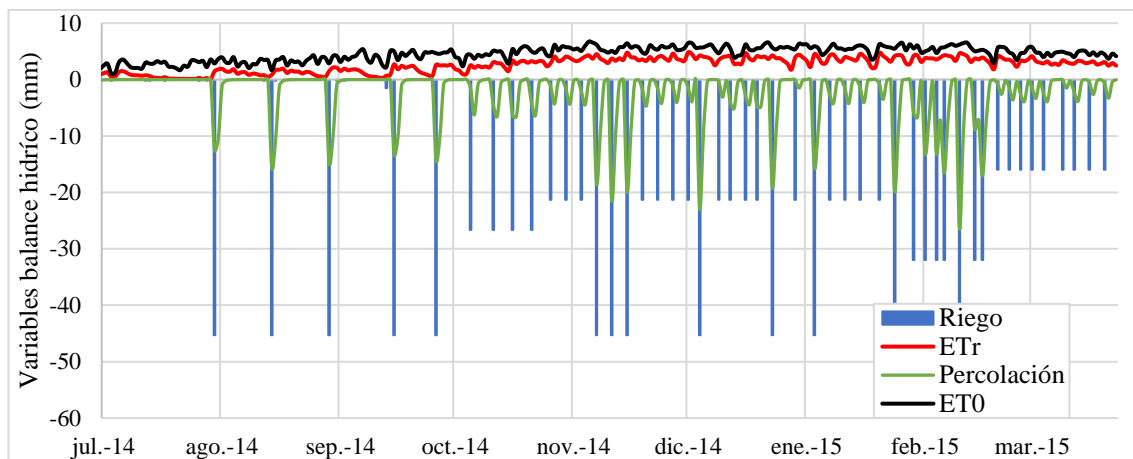


Figura 27. Variables del balance hídrico (mm) para uva pisquera, cuartel 1 Toledo.

La serie temporal del Kc_{real} obtenido por HYDRUS (en este caso $ETr/ET0$), en ambos cuarteles, mantiene curvas de Kc_{real} con similar conducta y con una variación despreciable entre los árboles del cuartel. Sin embargo, si se hace la misma relación a nivel del predio Toledo, la condición cambia, existiendo una mayor variación del Kc_{real} que aumenta la desviación estándar, aunque mantiene una tendencia similar (Figura 28). Esto se podría deber al desfase que existe en el riego de los cuarteles, manteniéndose la frecuencia de duración de estos (Figura 26).

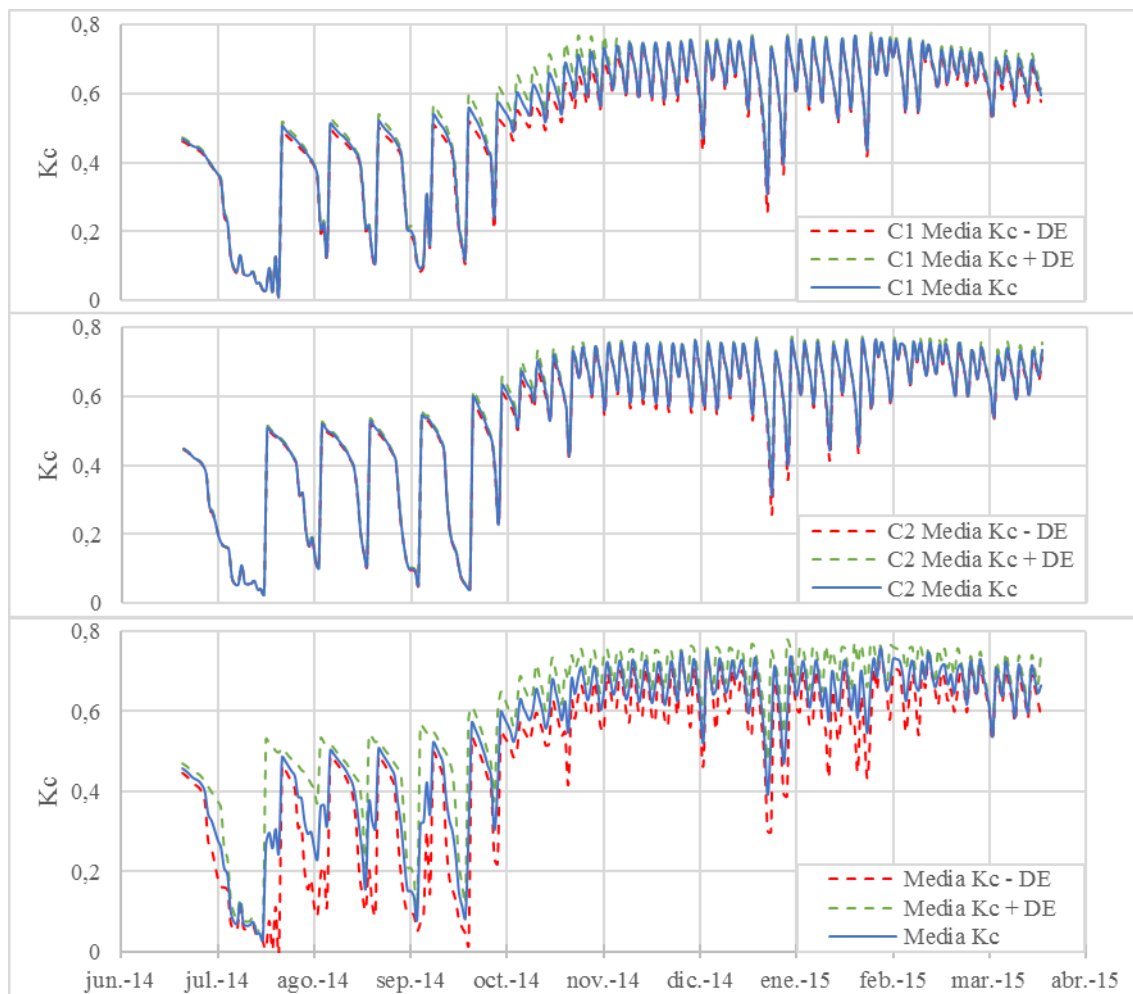


Figura 28. Serie temporal de Kc de uva pisquera, en el cuartel Toledo

El Kc decae rápidamente después de cada riego debido al desecamiento del perfil del suelo, sobre todo entre julio y octubre, periodo en el cual el cultivo tiene escaso follaje (Figura 43), en este periodo, el Kc está controlado por los procesos de evaporación (Figura 29), acusando importantes pérdidas por percolación debido a riegos excesivos. En el periodo de pleno desarrollo vegetativo, el Kc es predominado por la capacidad de transpiración de la planta, sufriendo una variación después de cada riego, por otro lado, se observa un proceso de decaimiento del Kc originado por un estrés de la planta durante el mes de diciembre. Esto se puede notar, por la caída del Kc pese a existir condiciones meteorológicas favorables y agua suficiente en el perfil de suelo.

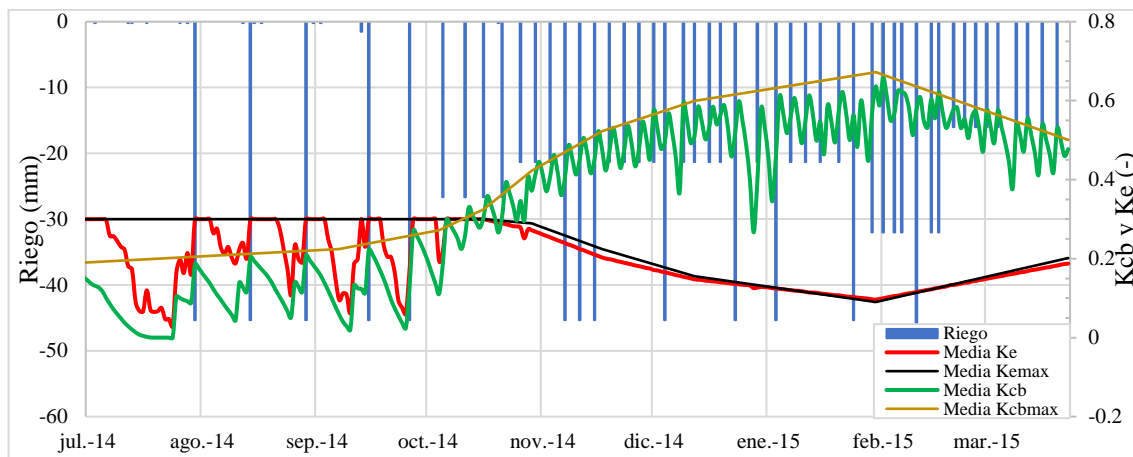


Figura 29. Serie temporal de Kcb, Kcbmax, Ke y Kemax en relación al riego del cuartel.

Respecto al balance de masa (Cuadro 5), existe una baja eficiencia del riego en este cultivo, puesto que solo alrededor de un 50% del agua aplicada se evapotranspira y el 50% restantes se percola, generando a su vez un estrés del cultivo por exceso de agua, donde la planta transpira un 19% menos de lo que debería (Figura 30). Además, se presenta un fenómeno a nivel de cuartel, en que los valores de evaporación y transpiración tienen una variación notoria entre los árboles, aunque se presentan valores de ETr estables, con una baja variación en el tiempo (Figura 31). Dicho fenómeno se explica por la estabilidad del Kc en cada cuartel, producto de la compensación entre el Kcb y Ke de cada árbol (Figura 29). En el proceso de percolación que ocurre en ambos cuarteles, los valores son bastante homogéneos entre árboles, debido a los altos valores de porcentaje de arena en los horizontes superficiales (aproximadamente un 40% de arena); en el horizonte sobre 35 cm de profundidad aumenta a un 87% de arena, produciendo una gran porosidad para el drenaje del agua.

Cuadro 5. Valores de las variables del balance hídrico en uva pisquera, cuartel Toledo.

Árbol	Entrada		Salida			Balance
	riego	Transpiración	Evaporación	Percolación	Total	
Planta 1	1385,43	460,17	243,10	669,74	1373,01	12,42
Planta 2	1385,43	425,34	269,56	680,69	1375,59	9,84
Planta 3	1385,43	511,23	190,82	669,70	1371,75	13,68
Planta 4	1433,43	522,35	184,34	698,13	1404,82	28,61
Planta 5	1433,43	515,30	188,64	701,53	1405,46	27,97
Planta 6	1433,43	421,45	281,51	705,32	1408,29	25,15
Media C1	1385,43	465,58	234,49	673,38	1373,45	11,98
Media C2	1433,43	486,37	218,16	701,66	1406,19	27,24
Media uva	1409,43	475,97	226,33	687,52	1389,82	19,61

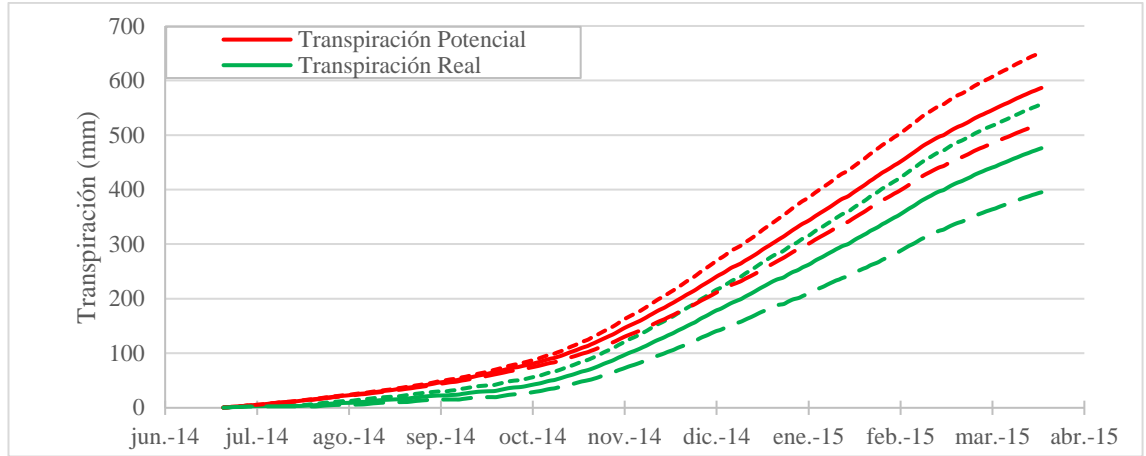


Figura 30. Serie temporal de valores acumulados de transpiración potencial y real (mm), en uva pisquera del cuartel Toledo.

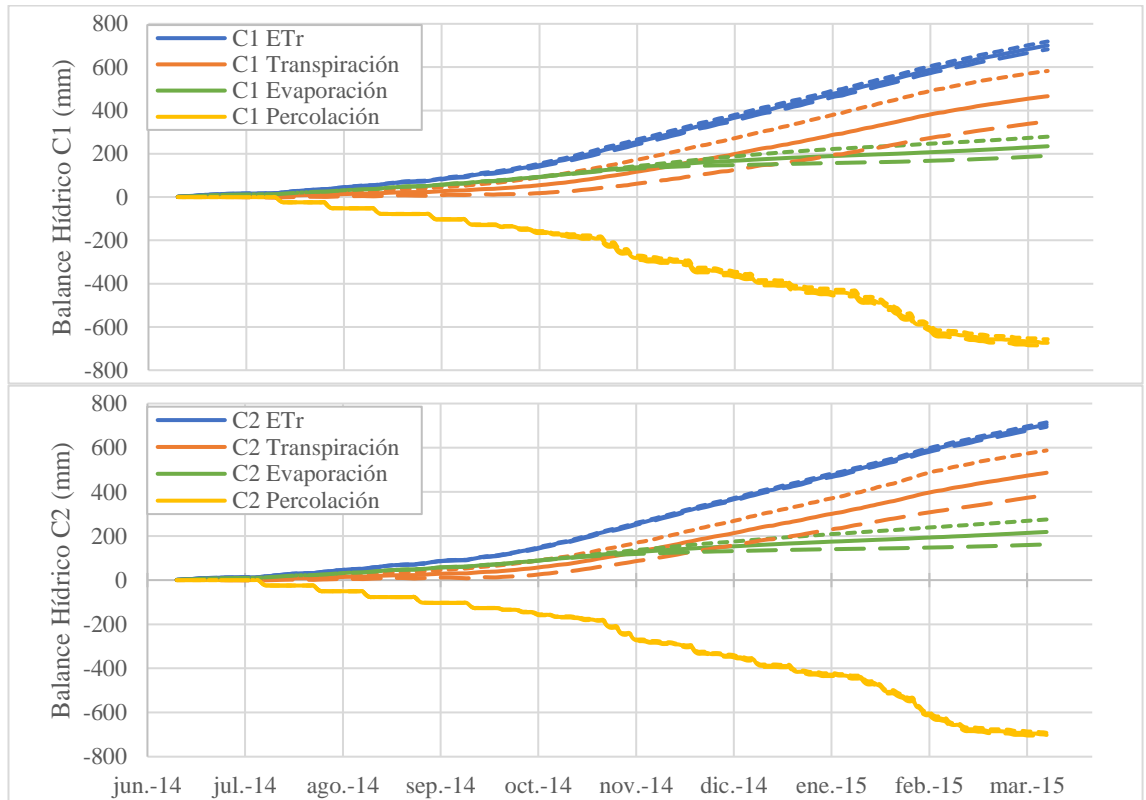


Figura 31. Serie temporal de valores acumulados de variables del balance hídrico (mm), en uva pisquera de los cuarteles Toledo.

Cartografía de Kc obtenida mediante percepción remota y evaluada por HYDRUS-1D

Uva pisquera

Los resultados del Kc espacial (SAVIgreen) para uva pisquera, evaluados mediante los resultados del modelo HYDRUS-1D, no fueron satisfactorios, aunque los resultados obtenidos para el coeficiente basal de cultivos (kcb) presentaron un ajuste aceptable (Figura 32), con un R^2 de 0.54 pero con un RMSE de 0,20 de Kcb y un BIAS de 46%. Para el Ke y el Kc si bien hubo un bajo ajuste, estas estimaciones presentan un RMSE menor que el Kcb.

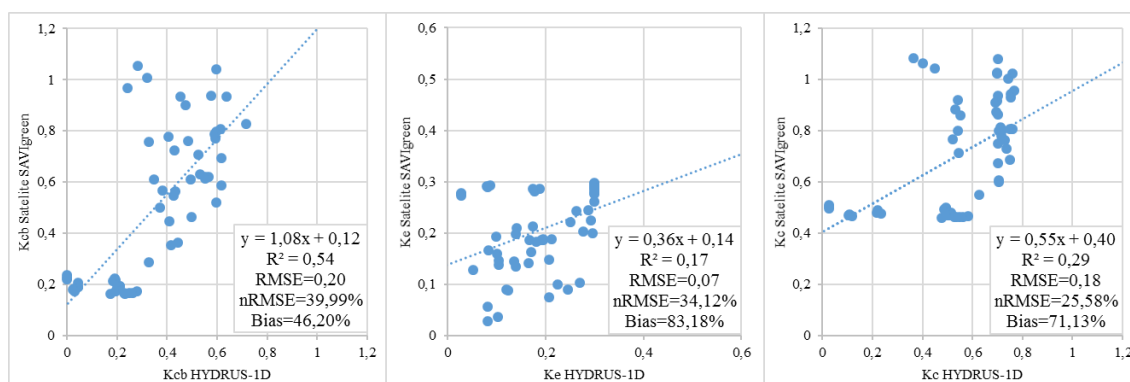


Figura 32. Evaluación de las estimaciones de kcb, ke y Kc obtenidas a partir de datos satelitales, utilizando los resultados obtenidos por el modelo HYDRUS-1D para los dos cuarteles de uva pisquera.

En general, se aprecia una sobreestimación del Kc y sus derivados por parte de la estimación satelital, lo que se ve reflejado en periodos de primavera-verano, por una gran diferencia entre las curvas de la estimación satelital y HYDRUS.

Al analizar los resultados de la dinámica temporal de cada planta, se puede apreciar que las 3 plantas del cuartel 2 presentan una disminución significativa de la transpiración en la fecha de diciembre de 2014, según la simulación HYDRUS, que actúa como un símil de validación (Figura 33). En esta figura, se observa que las plantas del cuartel 1 tienen un comportamiento similar tanto para el caso de HYDRUS, como para las estimaciones satelitales.

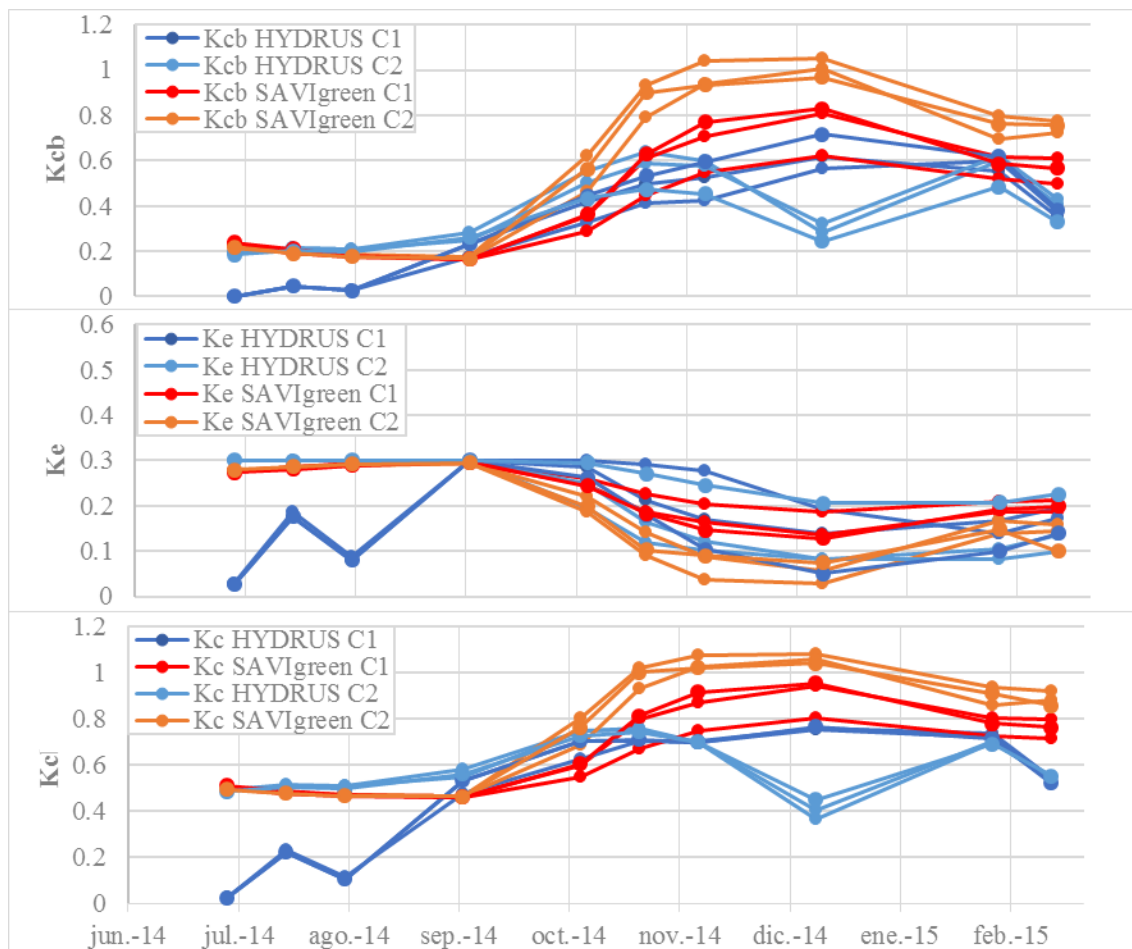


Figura 33. Dinámica temporal de la estimación del K_{cb} , K_e y K_c a partir de datos satelitales y mediante el modelo HYDRUS-1D para los dos cuarteles de uva pisquera.

Si consideramos el ajuste solo del Cuartel 1, que no tuvo esta disminución en la transpiración durante el periodo de verano. Se observa una importante mejora en los estadígrafos de evaluación del k_{cb} y K_c del método de estimación a partir de imágenes satelitales. Por otro lado, analizando los resultados del Cuartel 2, únicamente tiene una mejora de sus ajustes en el K_e . Al hacer el análisis de los coeficientes por cada cuartel, se aprecia que los valores de K_{cb} y K_e simulados por el HYDRUS-1D, obtuvieron notorias diferencias en el periodo de estudio.

En los cuarteles ocurren dos fenómenos posteriores a un riego, el primero está relacionado con el aumento de K_e , como se destaca entre los meses de julio y octubre, donde existe riegos duraderos y poco frecuentes combinados con una baja vegetación, que provocaron un aumento de la evaporación de la película de agua superficial, la cual el suelo no fue capaz de infiltrar, el satélite en este periodo captó la imagen previo al riego en el cuartel y posterior al riego en el cuartel 2 (Figura 34). El segundo, está relacionado con la disminución de la transpiración y por ende del K_{cb} y del K_c , ya que la planta no era capaz de transpirar por que el suelo estaba saturado en ese periodo. Durante el mes de enero del 2015 se obtiene la imagen satelital en el momento que ocurre este fenómeno desfasado por el riego (Figura 35). Esta discordancia entre la modelación satelital y la hidrológica se acrecientan en periodos de riegos abundantes y poco frecuentes en el tiempo.

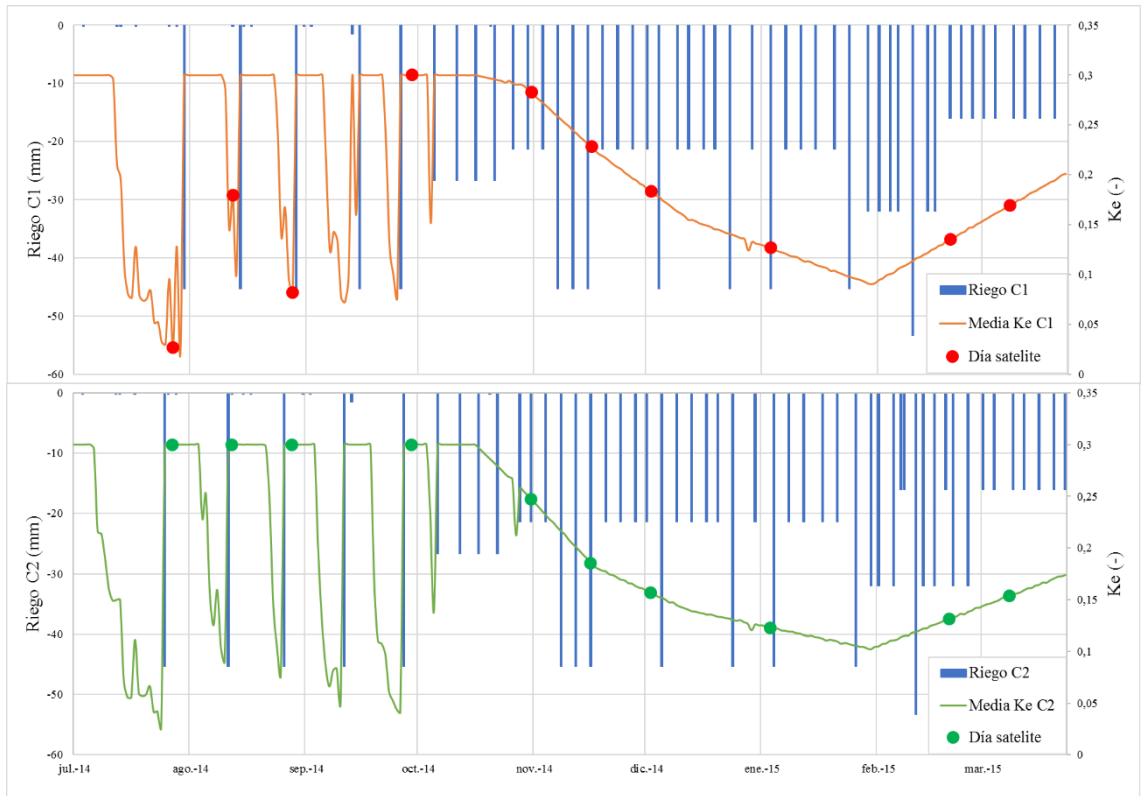


Figura 34. Serie temporal de Ke media de cada cuartel, con puntos el día de dato satelital y con barras los riegos de cada cuartel.

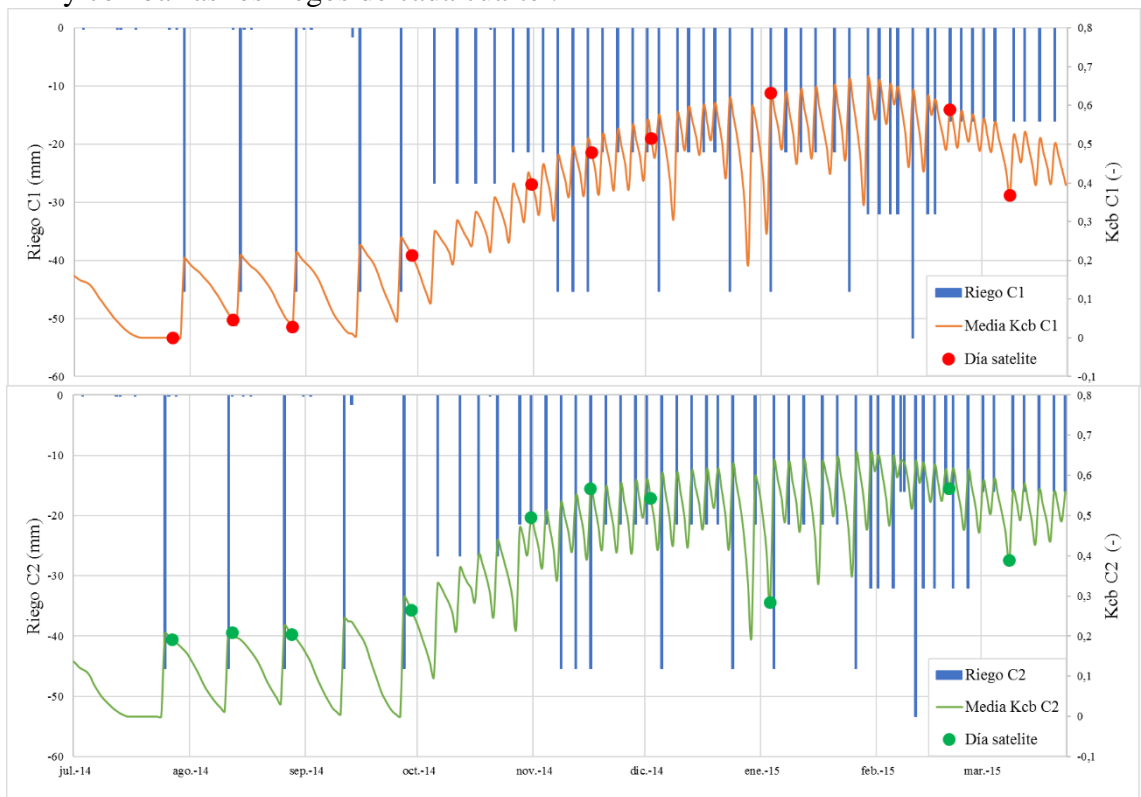


Figura 35. Serie temporal de Kcb media de cada cuartel. Con puntos se muestra el día de dato satelital y con barras los riegos de cada cuartel.

Con estos antecedentes se asume que la estimación satelital responde más bien al concepto de evapotranspiración máxima del cultivo, tanto para su parámetro K_{cb} , como para el K_e y K_c . Esto se ratifica en que los mejores ajustes fueron obtenidos al momento de evaluar estos parámetros frente a los valores de K_{cbmax} , K_{emax} y K_{cmax} , obtenidos a partir de la evaporación potencial y transpiración potencial de las simulaciones HYDRUS-1D (Figura 36).

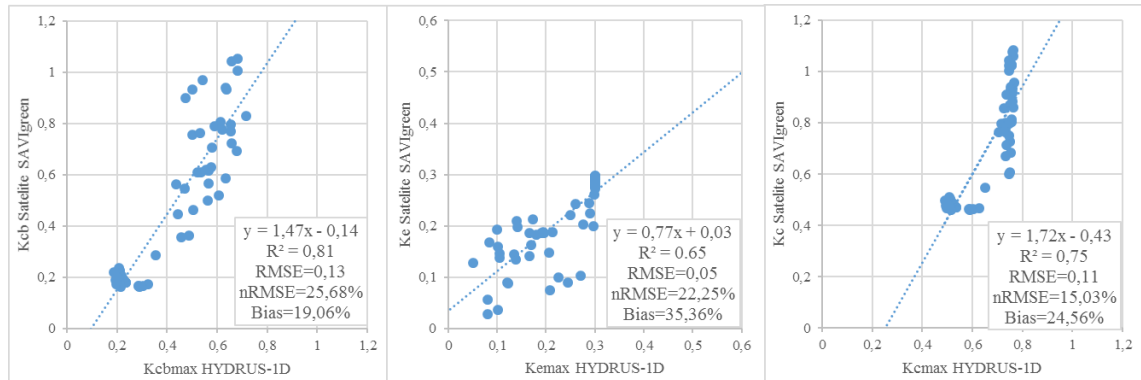


Figura 36. Evaluación de las estimaciones de k_{cbmax} , k_{emax} y K_c obtenidas a partir de datos satelitales, utilizando los resultados obtenidos por el modelo HYDRUS-1D.

Cartografías de K_c y de K_{cb} a partir de datos satelitales. Luego de la estimación de K_c y K_{cb} , los resultados de los estadígrafos, muestran una mayor representatividad para la extrapolación espacial en estos dos índices, al contrario, esto no ocurre con el K_e . En la Figura 37 se presentan los resultados de la modelación de K_c para el predio Toledo en sus dos cuarteles en tres etapas del cultivo, inicio, pleno desarrollo y senescencia.

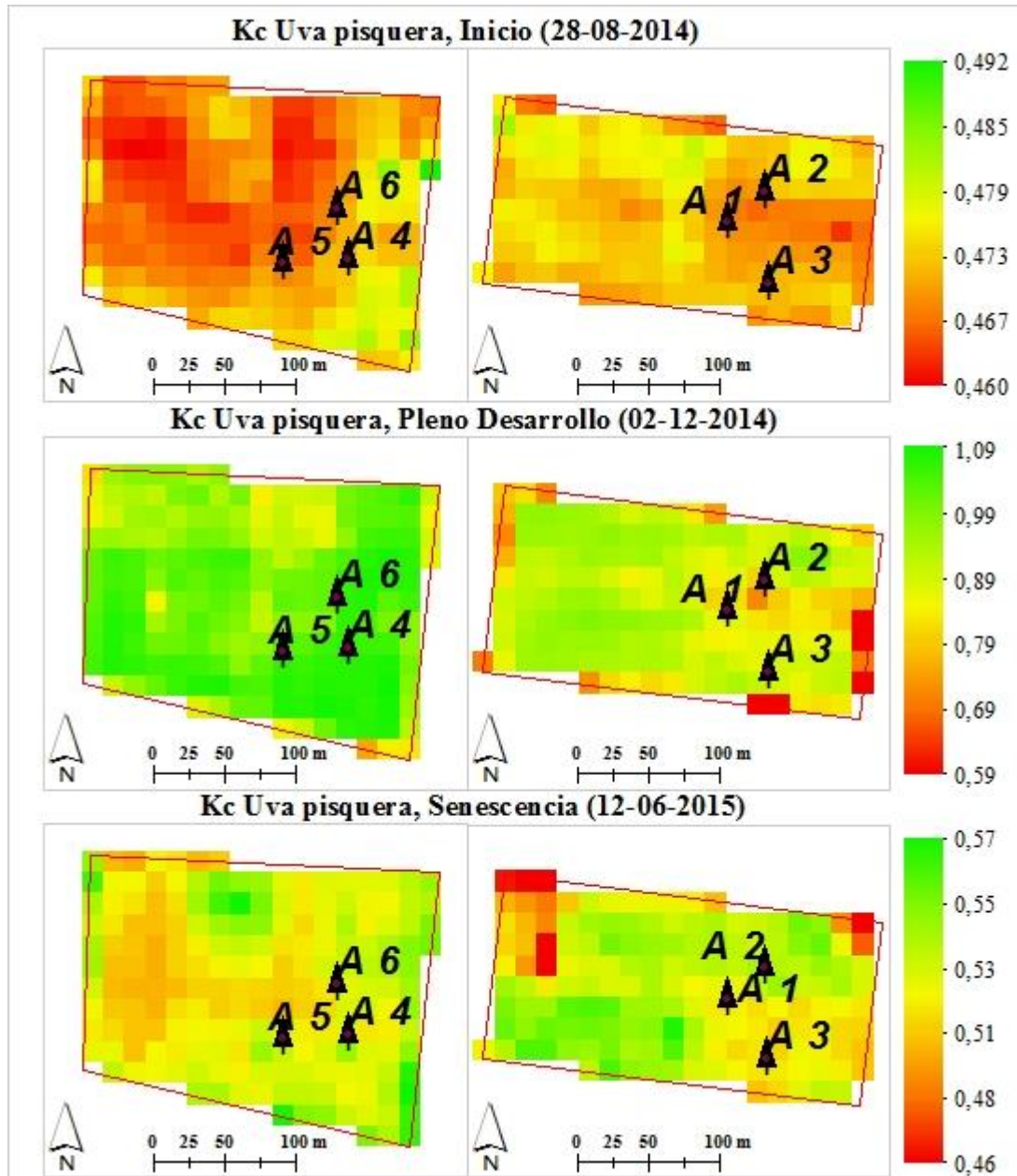


Figura 37. Cartografía del coeficiente de cultivo (Kc) a partir de imágenes satelitales para inicio, pleno desarrollo y senescencia en el predio de uva pisquera.

DISCUSIÓN

En el presente estudio, se evaluó la factibilidad de la espacialización del coeficiente de cultivo, basado en datos de terreno e imágenes satelitales, lo cual fue comparado a los resultados de Kc obtenidos por simulaciones de un modelo de transferencias hídricas. La naturaleza de la investigación es de tipo metodológica, por lo cual su posible aplicación no es limitada a solo los cultivos evaluados, sino que es factible de utilizar en otros, pero bajo las consideraciones de variación de la arquitectura foliar, el estado fenológico y la condición geográfica. Los resultados del estudio se discutirán en tres secciones. Primero, se evalúan y analizan la confiabilidad de las predicciones de las variables espaciales. Segundo, se analizan los resultados de Evapotranspiración real para cada árbol, por simulaciones diarias de la distribución de agua en el suelo. Tercero, se discuten los resultados de la comparación de los modelos (HYDRUS-1D y Teledetección).

Predicción de variables espaciales

La predicción del Índice de Área Foliar (IAF) los cultivos de olivos y uva pisquera, en general presentaron una gran diferencia en los estadígrafos. Los resultados que se obtuvieron para uva pisquera fueron de un $R^2 = 0,83$ para la regresión lineal SAVIgreen-IAF con imágenes de 15x15m (Landsat 8 OLI), los que son comparables con una investigación similar en un viñedo de marco de plantación de 3x3m, pero con imágenes satelitales IKONOS de una resolución espacial 4x4m, donde se obtuvo un R^2 entre 0,91-0,98 en la regresión lineal de NDVI-IAF, siendo el IAF obtenido por cámara óptica de modelo directo LI-3000 (Johnson, 2003). Estos resultados demuestran que la metodología para el cultivo de uva pisquera presentó resultados aceptables a pesar de que se trabaje con imágenes de menor resolución espacial y con modelos indirecto, a través de PAR, generando una disminución de los costos de información para los viticultores que desean monitorear secuencialmente IAF. Para el caso de olivos se obtuvo un ajuste de $R^2 = 0,38$ generando una gran incertidumbre en la predicción de IAF en los predios.

Lo anterior, se atribuye a diversos factores, entre ellos a que se utilizó un método similar de modelación de los predictores de IAF entre los cultivos. En terreno existieron algunas diferencias que se evidenciaron como el manejo de maleza y riego en los cultivos, la frecuencia temporal y la cantidad de la toma de datos de IAF por medio del ceptómetro, la fenología de los cultivos, la arquitectura foliar y finalmente la relación entre cobertura y marco de plantación.

Una de las desventajas de trabajar con imágenes satelitales de mediana resolución espacial es la homogeneización de la reflectancia de la superficie capturados en plantaciones, en los olivos esto podría ser un problema, debido a que la cobertura de los individuos respecto al marco de plantación es baja (Mallorquina 5% y Mal Paso 23 %), es decir, tiene un alto porcentaje de suelo descubierto. Entonces, si un pixel de 15x15m tiene una superficie de 225m², que contiene 40m² por cada marco de plantación, lo que corresponde a aproximadamente 6 individuos, por ende, como mínimo 75% de la reflectancia es medida en suelo, dificultando la estimación de IAF, porque la señal de la

canopia es muy baja en cada pixel, además el sensor satelital de una imagen de media resolución, no es capaz de discriminar la reflectancia entre el suelo con maleza y la canopia. Puede haber factores de manejo del olivo que puedan estar influyendo en esa discrepancia del IAF satelital, como los procesos de poda que afectan a la arquitectura de la canopia.

Para minimizar el efecto del manejo de los cultivos como la poda, cosecha y malezas, algunas investigaciones proponen el uso de imágenes de alta resolución para cultivos con $IAF < 4$, generando óptimos resultados para la estimación con índices vegetacionales (Johnson et al., 2001; Soudani et al., 2006), dejando abierta la posibilidad de mejorar los resultados de estos estudios al disminuir el tamaño de los pixeles inferiores a 15×15 m.

También, podemos encontrar diferencias en la arquitectura de los cultivos, ya que se obtuvieron valores mucho menores en IAF en los árboles de olivo (forma esférica como se pueden ver en la Figura 2a), por lo que presentaría un follaje más denso, derivado de una agrupación de las hojas en ciertas zonas del árbol, denominado efecto “*Clumping*” (Zamorano et al., 2010). Según Castillo et al. (2016) el *Clumping* afectaría directamente a la medición de PAR, generando radiación de dispersión por la reflectancia y transmitancia de las hojas. Un estudio más específico sobre el índice de *Clumping* en olivares en base a la ley de Beer-Lambert, demuestra que el aglutinamiento de las hojas afectaría en la estimación de IAF en métodos indirectos, por lo cual propone un algoritmo de corrección del índice de *Clumping* presentando resultados de IAF similares a los métodos directos (Moorthy et al., 2011).

La dimensión temporal es tan importante como la espacial para la predicción espacial, siendo sumamente relevante la cantidad de mediciones de PAR e imágenes satelitales en los cultivos; Ambos cultivos presentan un similar número de mediciones e individuos en estudio, pero existe una gran diferencia en la frecuencia de la toma de los datos, produciendo distorsión en los resultados, ya que la frecuencia debe ser acorde a la fenología del cultivo (Verger et al., 2016). Respeto a lo anterior, la frecuencia de la toma de los datos en olivos, presenta una discontinuidad de ellos, ya que se presenta un vacío de mediciones entre enero y diciembre del 2015. A su vez se debe considerar que los olivos de la zona de estudio, presentan una fenología no estándar (según Allen et al., 2006), probablemente causada por el estrés salino que se presenta la zona (Tapia et al., 2003). Ambos factores nos hacen suponer que las mediciones no fueron plenamente representativas de la fenología del olivo.

En cambio, en el cultivo de uva pisquera, las mediciones de terreno y satelitales, presenta una concordancia con la fenología de la especie, ya que la frecuencia de las mediciones fue representativa, obteniendo un leve aumento del IAF por brotación foliar, luego en primavera un intenso crecimiento, manteniendo un leve crecimiento en la formación y desarrollo de la baya, finalmente el IAF decae posterior a la cosecha y en otoño, ya que presenta hojas caducas (Ferreira et al., 2001b; Ibacache et al., 2010).

En base a lo anterior, es indispensable una dinámica temporal (la frecuencia y la cantidad de mediciones) acorde al cultivo en estudio, para tener un modelo de regresión adecuado.

Los resultados de K_c espacial están basados en índices vegetacionales los cuales fueron

calibrados con datos *in situ* de ceptómetro basados en la intercepción de la luz por parte del dosel. A partir de estas mediciones es posible entonces cuantificar el vigor de la vegetación, a través de procesos físicos de transferencias radiativas de la luz en el dosel. (Jones and Vaughan, 2010).

Análisis de la Evapotranspiración a escala local

Respecto a los resultados del balance hídrico en los olivares, estos presentan una adecuada eficiencia en el manejo del riego por goteo, ya que en el predio Mal Paso solo se tiene un déficit del 18% en la transpiración respecto a la requerida por la atmósfera y en el predio Mallorquina un 1,8% de déficit. Por otro lado, la evaporación representa un 36% del total de la evapotranspiración, estando dentro de márgenes satisfactorios respecto al tipo de riego y el suelo descubierto (Er-Raki et al., 2010). Finalmente, los cultivos de olivos presentan una pérdida del recurso por drenaje de 33% en promedio. En relación a las uvas pisquera presenta resultados similares a la investigación de Galleguillos et al. (2017), en este trabajo se estudiaron viñas de secano en Francia, donde los cultivos estuvieron entre 1 a 2 meses sin agua, con una ET media entre 1,46 mm d⁻¹ y 2,87 mm d⁻¹. En este estudio se obtuvieron resultados de evapotranspiración media de 2,62 mm d⁻¹, mostrando que los requerimientos hídricos para la uva pisquera son superiores a la uva vinífera, siendo el valor de Kc levemente superior a los requerimientos necesarios para la zona norte del país (DGA, 2007). A pesar de lo anterior, la uva pisquera no presenta un manejo eficiente del recurso, ya que presenta una pérdida del 50% del riego por percolación, por lo que se deduce que la eficiencia del riego, debe estar condicionada no solo con las necesidades atmosféricas, sino también a las características del suelo (Moreno et al., 1988)

El estrés hídrico en la uva pisquera funciona como una técnica de manejo para potenciar la calidad de la fruta, al igual que en la uva vinífera. En este sentido se ha utilizado el Riego Deficitario Controlado (RDC), para la mejora de la eficiencia del agua y para obtener resultados específicos en la producción (Cisterna y Ibacache, 2014). La humedad del suelo es un factor sumamente importante que debe tenerse en cuenta al evaluar el sistema suelo-planta-atmósfera (Han et al., 2015), sin embargo, se debe considerar que cuando ocurre un estrés continuo, puede causar graves daños a la producción (Galleguillos et al., 2011a). Este fenómeno se evidenció en diciembre del 2014 donde se presentó un riego excesivo, provocando una caída considerable en el Kc y Kcb, obtenido por HYDRUS, posiblemente ocasionado por fenómenos de hipoxia o anoxia de las raíces como ha ocurrido en otros casos (Jiménez et al., 2012; Schaffer, 2007). Los impactos que provoca la dinámica del agua en el suelo, incitan a una modelación más mecanicista en la interacción entre el agua y la vegetación, para obtener una representación de la reacción entre la fenología de la planta, humedad del suelo, temperatura, anoxia y ET (Han et al., 2015; Hoylu et al., 2014). No existe reporte de estudios de campo con estas condiciones de alteración del Kc por exceso de agua en uva pisquera.

HYDRUS-1D ha sido utilizado con éxito en varios cultivos incluyendo estudios en *vid vinifera*, lo que permite confirmar la aproximación metodológica para obtener valores de Kc_real. No obstante, no se reportan estudios para uva pisquera, por lo que se podría mejorar este estudio con una validación de los datos, tal como se realiza en numerosas

investigaciones como las de Galleguillos et al. (2017), Galleguillos et al. (2011a), Oguno et al. (2016) obteniendo resultados con ajustes confiables. Además, las modelaciones de HYDRUS 1D, cuando se realizan simulaciones con una dimensión temporal extensa, presenta mejores resultados de balance de masa (Sutanto et al., 2012).

Comparación de modelos

La cartografía de K_c está basada en la modelación espacial en base a imágenes satelitales, en la cual estos resultados son comparados con los datos de modelación de flujo de agua como método de validación. Estas dos aproximaciones metodológicas tienen como input los valores de K_{cbmax} y K_{cmax} estimado a partir de datos de terreno de IAF basados en la medición de la PAR. Solo se pudieron obtener resultados para el cultivo de uva pisquera, ya que para olivos la predicción de IAF y FI espacial obtuvo resultados no confiables, no pudieron generar cartografías de K_c espacial.

Los resultados nos indican mayor concordancia entre K_c espacial y el K_{cmax} , este último derivado de HYDRUS. Efectivamente este depende únicamente del potencial de la atmósfera a evapotranspirar y del IAF (obtenido por ceptómetro). Por otro lado, el pobre ajuste obtenido entre K_c espacial y K_c HYDRUS indica una mala estimación de la evapotranspiración real por parte de la estimación satelital, la cual se explica durante periodos de estrés hídricos en este caso, por exceso de agua. La E_{Tr} depende de la humedad en el suelo, la cual no puede ser representada por el enfoque de K_c espacial, a diferencia del K_c HYDRUS que se basa en las transferencias hídricas ocurridas en el perfil de suelo, aludiendo a un balance de masas.

Además, cabe mencionar sobre la discrepancia ocurrida entre la estimación del K_c espacial y el K_c HYDRUS, como se mencionó anteriormente estas dos modelaciones están regidas por procesos diferentes, en la cual HYDRUS al modelar la transferencia del flujo de agua, por ende, el K_c y el K_{cb} estarían siendo influenciados por distintas condiciones del suelo (Allen et al, 2006; Slatyer, 1957), como la humedad, es decir, afecta a la transpiración ya sea por falta de aguas, o como es en este caso el exceso de agua donde se generan fenómenos de estrés en las raíces por falta de agua (Jiménez et al., 2012). También, la diferencia de escala temporales entre los modelos, genera discrepancias en la comparación de estos, es decir, en la modelación HYDRUS se presenta una mayor sensibilidad a los procesos ocurridos en el suelo, siendo evidentes a una escala diaria, en cambio el satélite tiene un periodo de revisita de 16 días mínimo, no permitiendo evidenciar la variación del vigor de la vegetación a una escala temporal fina.

Pese que estos dos modelos se basan en principios diferentes, los resultados de las simulaciones satelitales en uva pisquera son aceptables como predictor, en particular en momentos donde no se registra estrés hídrico por parte de la planta dado el exceso de agua, así como falta de agua. El Enfoque de K_c espacial demostró ser útil, pese a ser un método únicamente basado en los cambios de vigor de la vegetación en base a modelación empírica (Pôças et al., 2015).

El desempeño de la modelación de K_c y K_{cb} espacial, al contrastar los resultados de K_{cmax} y K_{cbmax} contra los datos potenciales de las simulaciones de HYDRUS-1D,

presentaron valores confiables con altos niveles de ajuste. Estos resultados son comparables con la investigación de Pôças et al. (2015), quienes también realizaron estimaciones de K_c y K_{cb} mediante imágenes satelitales, obteniendo mejores ajustes utilizando SAVI como índice en las modelaciones, obteniendo un R^2 entre 0,79 a 0,95 en K_{cb} y en el K_c entre 0,72 a 0,99. Ambos resultados son comparables, a pesar que presentan varios supuestos, para la formulación del método, y no necesariamente este sea la causa de la diferencia de los resultados en K_c y en especial al K_e . Esto puede ser a causa de las diferencias edafoclimáticas, y a las condiciones de manejo además de estar en condiciones estándar sin problemas de alta salinidad.

Finalmente, revisando las fortalezas y las limitantes del método de K_c espacial, se puede considerar su implementación en lo posible cuando se realicen riegos con un manejo acorde a las condiciones de suelo, y no solo respecto al vigor de vegetación y las condiciones atmosféricas. De lo contrario se sugiere implementar otro tipo de aproximaciones que puedan estimar el contenido en el agua en el suelo además del vigor.

CONCLUSIONES

La modelación satelital para la extrapolación de variables de IAF, FI y la dinámica espacio-temporal del coeficiente de cultivo K_c fue correctamente obtenida para uva pisquera con resultados valiosos de cartografía de IAF, y de K_c basal, pero con discrepancias importantes al momento de considerar procesos biofísicos de alta resolución temporal como el efecto del momento de aplicación del riego sobre la transpiración del cultivo. En este sentido, se demostró que las estimaciones satelitales de K_{cb} , K_e y K_c están fuertemente correlacionadas al K_{cb} máximo, K_e máximo y K_c máximo aludiendo a la naturaleza de la información proveniente del satélite.

Los resultados de la caracterización del IAF, K_c y K_{cb} espaciales no pudieron ser realizados en olivos debido a la débil correlación existente entre los valores de terreno y los valores obtenidos vía satelital. Esto podría tener alguna relación con las alteraciones productivas que se encontraban en los predios de olivo. Para mejorar este punto se sugiere incorporar información remota de mayor resolución espacial para diferenciar claramente la superficie con el dosel del cultivo y el suelo.

El modelo hidrológico HYDRUS-1D demostró ser una herramienta de apoyo importante para la generación de información de variables del balance hídrico a escala local, caracterizando la dinámica temporal a escala diaria. Las simulaciones HYDRUS permitieron evidenciar una correcta estrategia de irrigación para los cultivos de Olivo, mostrando una baja pérdida por percolación, pero con diferencias entre predios encontrándose problemas de estrés en uno de los predios. Por otra parte, para la uva pisquera, HYDRUS evidencio un manejo deficiente del riego con pérdidas del orden del 50 % sobre el recurso hídrico por percolación, afectando a su vez el correcto desempeño de las plantas por exceso de agua.

Se plantea la opción de expandir la metodología a otros cultivos mediante la incorporación de nueva información remota de mejor resolución espacial que permita mejorar las predicciones a escalas más finas. Además, de corregir los posibles errores cometidos en los olivos, aumentando el número de mediciones en terreno y/o aumentando la frecuencia de éstas, para que concuerde con la fenología del cultivo en estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.; L. Pereira; D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia, 298 pp. (Estudio FAO Riego y Drenaje 56).
- Allen, R.; L. Pereira; M. Smith; D. Raes and J Wright. 2005. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 131, 2-13.
- Allen, R and L. Pereira. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig Sci*, 28, 17-34.
- Antúnez, A. y S. Felmer. 2009. Nodo tecnológico de riego en el secano Región de O'Higgins: Fase II. Instituto de Investigación Agropecuarias. Litueche, Chile, 120 h (Boletín INIA, N^a 190).
- Bouyoucos, G. 1951. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal*. 43(9): 434-438.
- Schaffer, B. 2007. Efectos de la deficiencia de oxígeno del suelo en platos (*Persea americana Mill.*). Seminario internacional: Manejo de riego y suelo en el cultivo de plato. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investivaion la Cruz, Chile. Serie Actas INIA N^o 41. 119p.
- Cánovas, F. y F. Alonso. 2014. Comparación de técnicas de fusión de imágenes de alta resolución espacial. *GeoFocus*. 14, 144-162.
- Campbell, G. and J. Norman. 1989. The description and measurement of plant canopy structure. (Cap. 1. pp. 15). In: Russel, M.; B. Marshall and P. Jarvis (eds.). *Plant canopies: their growth, form and function*. Cambridge University Press. 177p.
- Campbell, G. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest meteorology*. 36, 317-321.
- Campos, I.; C. Neale; A. Calera; C. Balbontín and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinífera L.*). *Agricultural and Water Management*. 98, 45-54.
- Castillo, F.; S. Castro; G Blanco; R. Sola and J. Gil. 2016. Olive Crown Porosity Measurement Based on Radiation Transmittance: An Assessment of Pruning Effect. *Sensors*. 16, 723, 1-13.

Cisterna, F y E. Ibacache. 2014. Riego deficitario controlado (RDC): una técnica para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego en vid pisquera. Escuela de Agronomía, Universidad de L Serena. *Revista electrónica de extensión agrícola Agua-Tierra*. 2, 8-11.

Dane, J. and J. Hopmans. 2002. Water retention and storage. 717-720p. In Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods*. Book Series N° 5. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

DGA (Dirección General de Aguas). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca de Río Copiapó. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Publica. 116p.

DGA (Dirección General de Aguas). 2007. Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras: Zona I Norte, Regiones I a IV. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Publica. 571p.

Er-Raki, S.; A. Chehbouni; G. Bolulet and D.G. Williams. 2010. Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*. 97, 1769–1778.

Feddes, R. A.; Kowalik, P. J. and Zaradny, H. 19 Simulation of field water use and crop yield. Inst. for Land and Water Management Res., 6700 AA Wageningen, Netherlands. 198p.

Ferreira, R; G. Sellés y I. Sellés. 2001a. Riego deficitario controlado en olivos: Estrategias de riego para enfrentar situación de escasez de agua en frutales. Santiago, Chile. Instituto de investigación agropecuarias. Boletín INIA N° 59, 48p.

Ferreira, R; G. Sellés y I. Sellés. 2001b. Riego deficitario controlado en uva de mesa: Estrategias de riego para enfrentar situación de escasez de agua en frutales. Santiago, Chile. Instituto de investigación agropecuarias. Boletín INIA N° 60, 44p.

Fichet, T.; B. Razeto y T. Curkovic. 2011. El Olivo: Estudio agronómico en la Región de Atacama. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 171 p. (Serie Ciencias Agronómicas N°16).

Frag, E.; S.M. Arafat; M.S. Abd El-Wahed and A.M. EL-Gindy. 2012. Estimation of Evapotranspiration ET_c, and Crop Coefficient K_c of Wheat, in South Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 156, 83-89.

Galleuillos, M.; F. Jacob; L. Prévot; P. Lagacherie and S. Liang. 2011a. Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*. 99, 168-172.

Galleguillos, M.; F. Jacob; L. Prévot; A. French and P. Lagacherie. 2011b. Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed from ASTER data. *Remote Sensing of Environment*. 115, 1326-1340.

Galleguillos, M.; F. Jacob; L. Prévot; C. Faúndez and A. Bsaibes. 2017. Estimation of actual evapotranspiration over a rainfed vineyard using a 1-D water transfer model: A case study within a Mediterranean watershed. *Agricultural Water Management*. 184. 67-76.

Gaona, G. 2009. Validación de Índice de Área Foliar (LAI) de Sensores Remotos con Mediciones Directas en la Reserva San Francisco (RSF). Tesis de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente. Área agropecuaria y de recursos naturales renovables, Universidad Nacional de Loja. 70h.

Gitelson, A.; J. Kaufman; R. Stark and D. Rundquist. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing Environ.* 80, 76-87.

Han, M.; C. Zhao; J. Šimůnek and G. Feng. 2015. Evaluating the impact of groundwater on cotton growth and root zone water balance using Hydrus-1D coupled with a crop growth model. *Agricultural Water Management*. 160, 64-75.

Härkönen, S.; A. Lehtonen; T. Manninen; S. Tuominen and M. Peltoniemi. 2015. Estimating forest leaf area index using satellite images: comparison of k-NN based Landsat-NFI LAI with MODIS-RSR based LAI product for Finland. *Boreal Environment Research*. 20, 181-195.

Hernández, J.L. 2007. Métodos para el análisis físico de los suelos: Manual de laboratorio. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). 54p.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25, 295-309.

Ibacache, A.; L. Martínez; C. Sturla; C. Montes; A. Carbonneau y J. Tonietto. 2010. Zonificación de territorio de la denominación de origen pisco. Programa de innovación territorial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi, Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas. 88p.

INE (Instituto nacional de estadísticas). 2007. Censo Agropecuario y Forestal 2007 Resultados por Comuna: Cuadro 10: Superficie con Frutales en Plantación Compacta o Industrial y Huertos Caseros en Formación y Producción, según Región, Provincia y Especie. CENSO AGROPECUARIO Y FORESTAL 2007 [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://www.ine.cl/estadisticas/censos/censo-agropecuario-y-forestal-2007>> Consultado el: 15 de mayo del 2017.

Jackson, J. and Palmer J. 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany*. 44, 381-383.

- Jiménez-Bello, M.; J. Castel; L. Testi y D. Intrigliolo. 2015. Assessment of a Remote Sensing Energy Balance Methodology (SEBAL) Using Different Interpolation Methods to Determine Evapotranspiration in a Citrus Orchard. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and Remote Sensing*. 8 (4), 1465-1477.
- Jiménez, J.; L. Moreno y S. Magnitskiy. 2012. Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 6 (1), 96-109.
- Johnson, L. 2003. Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 9, 96-101.
- Johnson, L. F.; D. Roczen and S. Youkhana. 2001. Vineyard canopy density mapping with IKONOS satellite imagery. Presented at the Third International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Denver, Colorado, 5-7 November 2001.
- Jones, H. and R. Vaughan. 2010. Remote Sensing of vegetation: Principles, Techniques and Applications. 384p.
- Kalma, J. D.; T.R. McVicar y M.F. McCabe. 2008. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics* Volume 29, Numbers 4-5, 421-469.
- Kremer, C. 2013. Informe de finalización: Programa de eficiencia hídrica para los agricultores del Sector San Fernando-Desembocadura de la Provincia de Copiapó. Fondo de innovación para la competitiva fic FNDR 2011, Gobierno Regional de Atacama. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 86 h.
- Kool, D.; N. Agam; N. Lazarovitch; J.L. Heitman; T.J. Sauer and A. Ben-Gal. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*. 184, 56-70.
- Lang, A. 1987. Simplified Estimate of Leaf Area Index from Transmittance of the Sun's Beam. *Agricultural and Forest Meteorology*. 411987, 179-186.
- Li, A.; W. Zhao and W. Deng. 2015. A Quantitative Inspection on Spatio-Temporal Variation of Remote Sensing-Based Estimates of Land Surface Evapotranspiration in South Asia. *Remote Sens*. 7(4), 4726-4752.
- Li, S.; S. Kang; F. Li; L. Zhang and B. Zhang. 2008. Vineyard evaporative fraction based on eddy covariance in an arid desert region of northwest china. *Agricultural and Water Management*. 95, 937-948.
- Li, Y.: D. Chen; C.N. Walker and J.F. Angus. 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research*. 118, 221-227.

Li, Z. L.; R. Tang; Z. Wan; Y. Bi; C. Zhou; B. Tang and et al. 2009. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9 (5), 3801-3853.

Lindberg, E.; J. Holmgren; K. Olofsson; J. Wallerman and H. Olsson. 2013. Estimation of tree lists from airborne laser scanning using tree model clustering and k-MSN imputation. *Remote Sensing*. 5, 1932–1955.

Liou, Y. A. and S. K. Kar. 2014. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms: A Review. *Energies*. 7 (5), 2821-2849.

Lopatin, J.; K. Dolos; H.J. Hernández; M. Galleguillos and F.E. Fassnacht. 2016. Comparing Generalized Linear Models and random forest to model vascular plant species richness using LiDAR data in a natural forest in central Chile. *Remote Sensing of Environment*. 173, 200-210.

Maes, W.H and K. Steppe. 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*. 63 (13), 4671-4712.

Matus, N.; B. Fernández; M. Aedo y S. Larraín. 2004. Recursos Hídricos de Chile: Desafíos para la Sustentabilidad. Santiago, Chile: LOM- ediciones. 169 p. (Programas Chile Sustentable, ISBN: 956-7889-20-1).

Moorthy, I.; J. Miller; J. Jimenez; P. Zarco-Tejada and B. Hu and J. Chen. 2011. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151, 204-214.

Moreno, F.; G. Vachaud; J. Martin-Aranda; M. Vauclin y E. Fernández. 1988. Balance hídrico de un olivar con riego gota a gota. Resultados de cuatro años de experiencias. *Agronomie, EDP Sciences*. 8(6): 521-537.

Murillas, A. y E. Londoño. 2014. Estimación de la evapotranspiración en cultivos de arroz con sensores remotos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Topográfico. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil Y Geomática, Ingeniería Topográfica, Santiago De Cali. 143p.

Nikolov, N. and Zeller K. 2006. Efficient retrieval of vegetation leaf area index and canopy clumping factor from satellite data to support pollutant deposition assessments. *Environmental Pollution*. 141, 539-549.

Ogundipe, E.; O. Oniya; G. Awe and T. Abegunrinn. 2016. Testing of Two Algorithms in Simulating Soil Water Dynamics in a Drip Irrigated Tomato under Different Irrigation Frequencies and Depths in Ogbomoso, Nigeria. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*. 16 (5), 934-945.

- Orgaz, F.; L. Testi; F.J. Villalobos and E. Fereres. 2006. Water requirements of olive orchards-II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrig Sci.* 24, 77-84.
- Pachepsky, Y.; D. Timlin and W. Rawls. 2003. Generalized Richards's equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Journal of Hydrology.* 272, 3-13.
- Pizarro, R.; C. Morales; F. Balocchi; C. Sangüesa y J. Vargas. 2008. Aguas Continentales. (Cap. 2, pp. 71-103). Informe país Estado del Medio Ambiente en Chile 2008. Santiago, Chile. 508p. (Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile, I.S.B.N. 956-19-0529-9).
- Pôças, I.; T. Paço; P. Paredes; M. Cunha and L. Pereira. 2015. Estimation of Actual Crop Coefficients Using Remotely Sensor Vegetation Indices and Soil Water Balance Modelled Data. *Remote Sensing.* ISSN 2072-4292.
- Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D Simulation Model to Evaluate Wetted Soil Volume in Subsurface Drip Irrigation Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 133, 342-349.
- Rallo, G. and G. Provenzano. 2013. Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea* L.) to soil water deficit conditions. *Agricultural and Water Management.* 120, 79-88.
- Ramos, A. and F. Santos. 2009. Water use, transpiration, and crop coefficients for olives (cv. Gordovil), grown in orchards in Southern Portugal. *Biosystems engineering.* 102, 321-333.
- Ramos, T.; J. Šimůnek; M. Goncalves; J. Martins; A. Prazeres; N. Castanheira. et al. 2011. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *Journal of Hydrology.* 407, 129-144.
- Rana G. and N. katerji. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy.* 13, 125-153.
- Rouse, J.; R. Haas; J. Schell and D. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Remote Sensing Center.* 20, 309-317.
- Salfate, E. 2005. Modelación numérica de la recirculación de lixiviados en un relleno sanitario, aplicación al relleno sanitario Santiago Poniente. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 177h.
- Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelo. Publicaciones Departamento de Suelo y Recursos Naturales N°5. Universidad de Concepción, Chillan. Chile.

SEPOR (Servicio de Programación y optimización del Uso del Agua de Riego). 2010. Boletín Informativo: Coeficiente de Cultivo (Kc). Comisión Nacional de Riego, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Chile. 7h

Šimůnek, J.; K. Huang; M. Šejna, and M. Th. van Genuchten. 1998. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 1.0. IGWMC - TPS - 70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 186 pp.

Šimůnek, J.; M. Šejna and M. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D Software Package for Simulating Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 2.0. Riverside, California: U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

Šimůnek, J.; M. Šejna; H. Saito; M. Sakai and M. van Genuchten. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media. Version 4.16, HYDRUS Software Series 3. Riverside, California: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside. 340 p.

Šimůnek, J.; M. Th. Van Genuchten and M. Sejna. 2008. Development and Applications of the HYDRUS an STANMOD Software and Related Codes. VADZONE. 7 (2), 587-600.

Slatyer, R. 1957. The influence of progressive increases in total soil moisture stress on transpiration, growth, and internal water relationships of plants. *Australian Journal of Biological Sciences*. 10, 320-336.

Soudani, K.; C. François; G. le Maire; V. Le Dantec and E. Dufrêne. 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment*. 102, 161-175.

Soylu, M.; C. Kucharik and S. Loheide. 2014. Influence of groundwater on plant water use and productivity: Development of an integrated ecosystem – Variably saturated soil water flow model. *Agricultural and Forest Meteorology*. 189-190, 198-210.

Subedi, A. and J. Chávez. 2015. Crop Evapotranspiration (ET) Estimation Models: A Review and Discussion of the Applicability and Limitations of ET Methods. *Journal of Agricultural Science*. 7 (6), 50-68.

Sutanto, S.; J. Wenninger; A.M.J. Coenders-Gerrits and S. Uhlenbrook. 2012. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16, 2605-2616.

Tasumi, M. and R. Allen. 2007. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural and Water Management*. 88, 54-62.

Tapia, F.; M. Astorga; M. Ibacache; A. Martínez; L. Sierra; C. Quiroz; C. Larraín y F. Riveros. 2003. Manual del cultivo del olivo. Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional Intihuasi. La Serena, Chile. Boletín INIA N° 101, 128p.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 1974. Methods for water balance computations: An international guide for research and practice. Paris, Francia. 127p.

Urdanoz, U. y R. Aragüés, 2007. Estimación de la tolerancia de la viña a la salinidad, en riego por goteo [en línea]. Recuperado en: <<http://www.aeryd.es/empresas/aeryd/sinopsis%20congreso/SINOPSIS%2026%20CNR%20HUESCA/B%20SINOPSIS%20PDF/S-B-07.pdf>> Consultado el: 14 de mayo del 2017.

USGS (United States Geological Survey). 2015. PRODUCT GUIDE: Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product. Version 1.5, July 2015. Department of the Interior. 27pp.

Van Genuchten, M.; F. Leij and S. Yates. 1991. The RETC code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. Riverside, California: U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

Verger, A.; I. Filella; F. Baret y J. Peñuelas. 2016. Caracterización de fenología de la vegetación a escala global mediante series temporales SPOT VEGETATION. *Revista de Teledetección*. 47, 1-11.

Wilmans, W. 2005. Estudio práctico, teórico y numérico acerca de la atenuación natural en suelos naturales. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico. Universidad de Chile Facultad de ciencias físicas y matemáticas. 117h.

Zamorano, N.; D. Arancibia; V. García de Cortázar y N. Franck. 2010. Estimación del índice de área foliar por medio de la interceptación de radiación solar en vid y olivo. 61° Congreso Agronómico de Chile. 26-29 septiembre. Santiago.

Zamorano, N. 2011. Estimación del índice de área foliar por medio de la interceptación de radiación solar en vid y olivo. Memoria Ingeniero Agrónomo, mención Fruticultura. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 28h.

Zhan, C.; Q. Dong; W. Ye; H. Wang and F. Wang. 2015. A review on evapotranspiration data assimilation based on hydrological models. *Acta Geographica Sinica*. 70,809-818.

Zhang, B.; S. Kang; F. Li y L. Zhang. 2008. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and Water Management*. 148, 1629-1640.

APENDICES

Apéndice I (Metodología)

Registro de datos utilizados

Cuadro 6. Ubicación geográfica de los individuos en estudio, DATUM WGS 84, Proyección UTM zona 19S.

Especie	ID Árbol	Coordenadas Sur	Coordenadas Oeste
Olivo	Mal Paso A1	347,750	6,977,271
	Mal Paso A2	347,739	6,977,256
	Mal Paso A3	347,728	6,977,232
	Mallorquina A1	344,835	6,975,280
	Mallorquina A2	344,806	6,975,291
	Mallorquina A3	344,796	6,975,271
Uva pisquera	Toledo C1 A1	356,339	6,980,068
	Toledo C1 A2	356,365	6,680,090
	Toledo C1 A3	356,367	6,980,025
	Toledo C2 A4	356,061	6,979,818
	Toledo C2 A5	356,015	6,979,815
	Toledo C2 A6	356,053	6,979,855

Cuadro 7. Serie temporal de las mediciones en terreno con ceptómetro lineal.

N° de Medición	Uva pisquera		Olivos	
	Toledo	Mallorquina	Mal Paso	
1	07/09/2014	25/07/2014	24/07/2014	
2	04/10/2014	06/09/2014	05/09/2014	
3	16/10/2014	05/10/2014	27/10/2014	
4	29/10/2014	18/11/2014	11/12/2014	
5	17/11/2014	11/12/2014	30/01/2015	
6	12/12/2014	19/12/2015	18/12/2015	
7	30/01/2015	27/01/2016	26/01/2016	
8	03/06/2015	-	-	

Cuadro 8. Serie temporal de imágenes satelitales estudiadas.

2014	2015
21/03/2014	03/01/2015
09/06/2014	20/02/2015
27/07/2014	08/03/2015
12/08/2014	12/06/2015
28/08/2014	14/07/2015
29/09/2014	15/08/2015
31/10/2014	19/11/2015
16/11/2014	21/12/2015
02/12/2014	-

Estimación de Evapotranspiración de referencia (ET0)

Basado en la ecuación 1, para obtener el K_c , se requiere la estimación del $ET0$ a escala diaria, mediante la Ecuación de FAO Penman-Monteith (ecuación 31) (Allen et al., 2006), con datos meteorológicos locales. Para el cálculo de $ET0$, la magnitud del flujo diario de calor del suelo (G) debajo de la superficie de referencia es relativamente ínfimo, es posible despreciar este valor según Allen et al. (2006)

$$ET0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Ec. 31})$$

Ecuación 31. Donde $ET0$ es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s presión de vapor de saturación (kPa) (Ecuación 34), e_a presión real de vapor (kPa) (Ecuación 35), $e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa), Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) (Ecuación 33) y γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) (Ecuación 32)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,665 * 10^{-3} * P \quad (\text{Ec. 32})$$

Ecuación 32. Donde γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), P es la presión atmosférica (kPa), λ calor latente de vaporación $2,45 \text{ (MJ kg}^{-1}\text{)}$, c_p calor específico a presión constante $1,013 * 10^{-3} \text{ (MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)}$, ε es el cociente del peso molecular de vapor de agua y del aire seco = 0,622 (-).

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * e^{\left(\frac{17,27 * T_{media}}{T_{media} + 237,3} \right)} \right]}{(T_{media} * 237,3)^2} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (\text{Ec. 34})$$

$$e_a = e^{\circ}(T_{media}) * \frac{HR_{media}}{100} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * e^{\left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right]} \quad (\text{Ec. 36})$$

Ecuación 33, 34, 35 y 36. Donde Δ pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e° presión de vapor a la temperatura del aire (kPa), T_{max} es la temperatura del aire máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} es la temperatura del aire mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$), T_{media} se entiende como el promedio entre T_{max} y T_{min} ($^{\circ}\text{C}$) y HR_{media} es el promedio de la humedad relativa diaria (%)

Estimación de K_e

Dado que la estimación de K_e depende de la humedad disponible en el suelo, el valor utilizado es referencial, asumiéndose que la superficie expuesta del suelo dispone constantemente de humedad, con un coeficiente adimensional de reducción de la evaporación del suelo (K_r) igual a 1, es decir, no existe un gradiente de reducción de la evaporación. Por medio de la ecuación 37 se obtuvo el K_e , donde se requirieron datos meteorológicos, datos del marco de plantación y la altura de los individuos. (Allen et al., 2006)

$$K_e = \min(K_r(K_{cmax} - K_{cb}), f_{ew} * K_{cmax}) \quad (\text{Ec. 37})$$

Ecuación 37. K_{cmax} es el valor máximo de K_c después de un riego o lluvia (-) y f_{ew} es la fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido (-) (Ecuación 40).

$$K_{cmax} = \max\left(\left\{1, 1 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3}\right\}, \{K_{cb} + 0,05\}\right) \quad (\text{Ec. 38})$$

Ecuación 38. Donde h será la altura máxima promedio de las plantas durante el periodo de cálculo considerado (m), u_2 es el valor promedio de la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), HR_{min} es la humedad relativa mínima (%), K_{cb} se estimó con el valor máximo que puede alcanzar la planta después de un riego o lluvia, debido a esto se estimó el $K_{cb_{full}}$ (-) (Ecuación 39) y donde $\max()$ será el valor máximo de los parámetros entre los paréntesis () separados por comas.

$$K_{cb_{full}} = K_{cb_{med, Tabla}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{Ec. 39})$$

Ecuación 39. $K_{cb_{med, Tabla}}$ es el coeficiente de cultivo basal a mediados de temporada con un valor fijo para cada especie según Allen et al. (2006),

$$F_{ew} = \min([1 - f_c], f_w) \quad (\text{Ec. 40})$$

Ecuación 7. Donde f_c es la fracción de cobertura efectiva, es decir, la superficie del suelo cubierta por vegetación (-) (Ecuación 41), f_w es la fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia, y donde $\min()$ será el valor mínimo de los parámetros entre los paréntesis () separados por comas.

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}}\right)^{(1+0,5h)} \quad (\text{Ec. 41})$$

Ecuación 41. Donde f_c es la fracción efectiva de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación (0-0,99), K_{cb} coeficiente basal del cultivo para un período particular, K_{cmin} valor mínimo de K_c para suelo sin cobertura y seco ($\approx 0,15 - 0,20$), K_{cmax} valor máximo de K_c inmediatamente después del humedecimiento y h altura promedio de la planta (m). (Allen et al., 2006)

Para el valor de la fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia no se utilizaron los valores establecidos por Allen et al., (2006) como se muestran en el Cuadro 9 (los valores utilizados para uva pisquera, consideraron como referencia los valores de uva de mesa), todo esto se debe a que en el área de estudio se encuentra una vegetación en condiciones no estándar, por lo cual se estimó con las condiciones de cada cultivo por medio de la ecuación 42.

$$f_w = \frac{(\text{ancho de mojamiento}) * (\text{dist. sobre hilera}) * (1 - FI)}{(\text{marco de plantación})} \quad (\text{Ec. 42})$$

Ecuación 42. Donde *ancho de mojamiento* es la distancia mojada, medida perpendicularmente desde el árbol entre las hileras (m), *dist. sobre hilera* es la distancia entre los puntos medios de los árboles colindantes en la hilera (m), *marco de plantación* es el área entre la distancia entre hilera con la distancia sobre hilera de cada especie (m²) y *FI* es la fracción de suelo interceptada por la vegetación (-) (ecuación 12).

Cuadro 9. Parámetros para el cálculo de evaporación de los cultivos en estudio.

Especie de cultivo	kcb _{ini}	kcb _{med}	kcb _{fin}	ancho de mojamiento	dist. sobre hilera	marco de plantación
uva pisquera	0,15	0,80	0,40	1,2	5	9
olivo	0,55	0,65	0,65	1,5	3	40

Corrección de datos PAR del ceptómetro lineal

Con el fin de disminuir el error de los datos de *PAR*, se realizó una corrección considerando el supuesto de que todos los sensores del ceptómetro deberían registrar el mismo valor al momento de medir *PAR₀*, para lo cual se utilizó la ecuación 43, obteniendo un nuevo valor para cada sensor en cada medición de la grilla del marco de plantación.

$$n'_{(j,i)} = PARO_{media} * \frac{\sum_{j=1}^{nm} \sum_{i=1}^{ns} n_{(j,i)}}{\sum_{i=1}^{ns} n_{(i,1)}} \quad (Ec. 43)$$

Ecuación 43. Siendo $n_{(j,i)}$ el *PAR_{ni}* medido ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{seg}^{-1}$), $n'_{(j,i)}$ es el *PAR_{ni}* corregido respecto a *PAR₀* ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{seg}^{-1}$). *nm* número de mediciones que se realizaron en la grilla del marco de plantación, *ns* representa el número de sensores que se encuentran en el ceptómetro lineal.

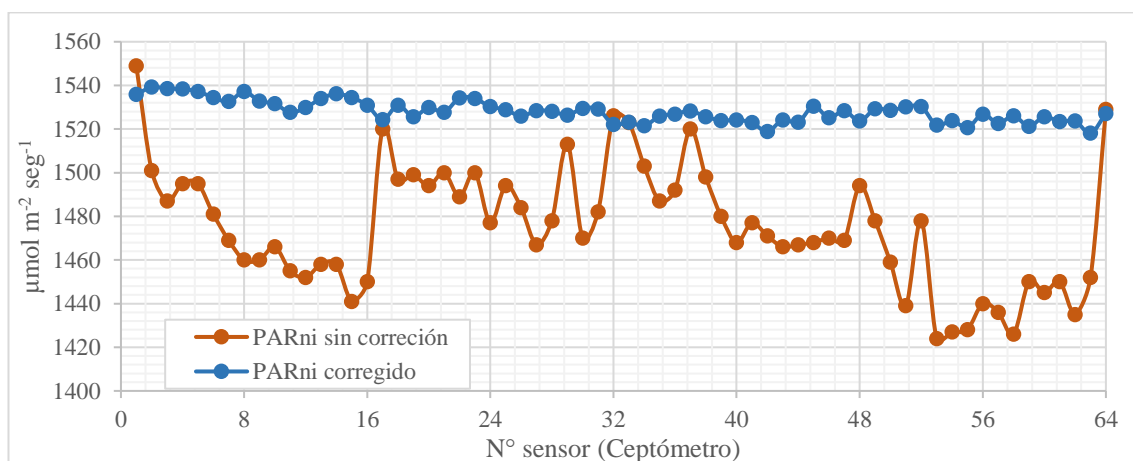


Figura 38. Se observan los datos sin corrección (naranja) y corregidos (azul) obtenidos con la ecuación 43. En el eje x están los 64 sensores y en el eje y la radiación PAR.

Apéndice II (Resultados)

Valores del coeficiente de extinción (k)

Cuadro 10. Media de k modelado en el periodo de estudio para olivos.

Predio	Árbol	k real
Mal Paso	A1	0,51
	A2	0,61
	A3	0,62
Mallorquina	A1	0,53
	A2	0,51
	A3	0,45
Media para Olivo	-	0,54

Cuadro 11. Media de k modelado en el periodo de estudio para uva pisquera.

Predio	Árbol	k real
Toledo	A1	0,81
	A2	0,87
	A3	0,66
	A4	0,61
	A5	0,61
	A6	0,60
Media para Uva pisquera	-	0,69

Perfil de suelo

La caracterización de suelo, al realizar las calicatas en los predios, se obtuvo como resultados los perfiles de suelo como lo muestra la Figura 39, estos perfiles tienen una profundidad total de 80 centímetros, luego estos se dividieron en horizontes como se visualiza sector izquierdo de la figura diferenciados por colores, además en el sector derecho se muestran la presencia de raíz en el suelo graficado en una escala de 0-1.

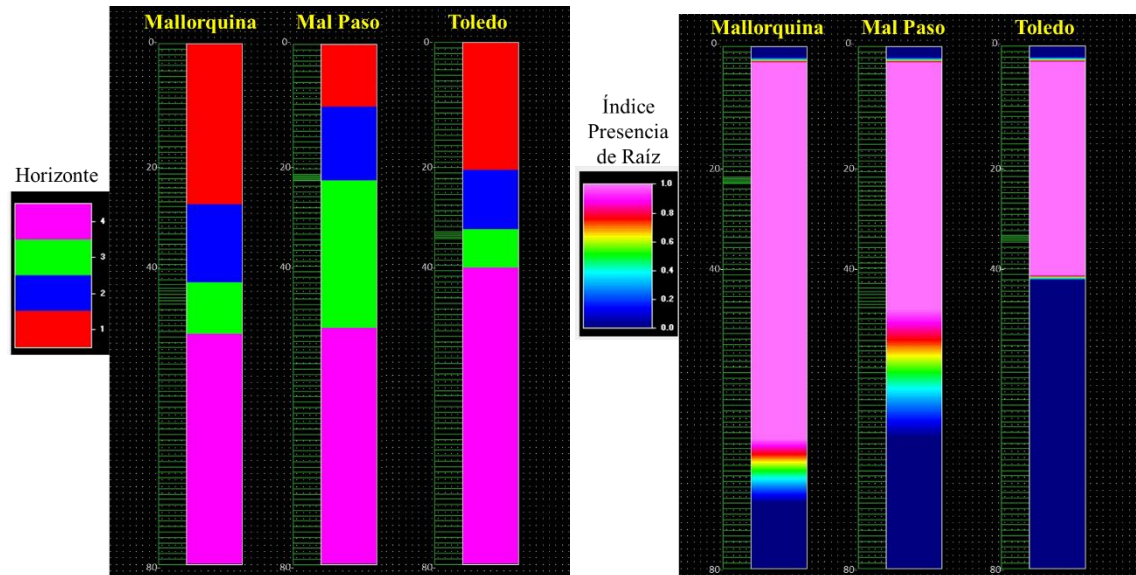


Figura 39. Perfiles de suelo, lado izquierdo representa la variación de horizontes y el derecho porcentaje de raíz presente.

Valores de suelo, RETC y ROSETTA

Cuadro 12. Resultados de Textura en cada horizonte por cuartel.

Cuartel	Profundidad (cm)	% Arena	% Limo	% Arcilla	DA
Toledo	0 - 20	40,12	29,73	30,15	1,37
	20 - 29	43,49	33,00	23,51	1,27
	29 - 35	43,27	49,59	7,14	1,03
	35 - 80	87,33	6,13	6,54	1,28
Mal Paso	0 - 10	11,16	77,25	11,59	1,37
	10 - 21	10,37	48,13	41,50	1,38
	21 - 44	14,48	41,10	44,42	1,23
	44 - 80	3,39	20,16	76,45	1,19
Mallorquina	0 - 25	38,09	42,12	19,79	1,06
	25 - 37	62,00	24,63	13,36	1,18
	37 - 45	19,30	50,70	30,00	1,11
	45 - 80	32,70	50,68	16,62	1,28

Cuadro 13. Valores de la curva característica de suelo, en 5 tensiones para cada cuartel.

Cuartel	Profundidad (cm)	CC 33 kPa (0,3 atm)	66 kPa (0,6 atm)	110 kPa (1 atm)	550 kPa (5 atm)	PMP 1500 kPa (15 atm)
Toledo	0 - 20	19,43	19,03	14,42	11,76	8,6
	20 - 29	18,79	18,76	13,26	10,46	8,04
	29 - 35	28,41	23,95	19,1	15,93	13,36
	35 - 80	5,55	4,78	3,98	3,72	3,61
Mal Paso	0 - 10	22,46	21,29	16,82	13,26	8,24
	10 - 21	19,93	19,48	16,29	10,77	9,23
	21 - 44	31,21	29,85	21,65	16,8	9,58
	44 - 80	31,07	24,64	19,85	12,91	7,57
Mallorquina	0 - 25	31,71	31,55	24,4	25,83	18,41
	25 - 37	30,67	28,22	23	21,73	16,16
	37 - 45	27,81	26,53	21,27	17,38	11,59
	45 - 80	33,9	31,83	29,23	25,84	18,76

Cuadro 14. Valores de las simulaciones de la Ecuación de van Genuchten-Mualem.

Cuartel	Profundidad (cm)	RETC					ROSETT A	
		θ_r	θ_s	alpha	n	l	R ²	ks
Toledo	0 - 20	0,0 0	0,2 4	0,00 6	1,2 3	0,5 0	0,9 5	12,97
	20 - 29	0,0 7	0,2 2	0,00 2	1,6 5	0,5 0	0,9 3	23,95
	29 - 35	0,1 4	0,3 4	0,00 3	1,9 7	0,5 0	0,9 8	171,46
	35 - 80	0,0 4	0,0 6	0,00 2	4,2 9	0,5 0	1,0 0	352,24
Mal Paso	0 - 10	0,0 0	0,4 5	0,05 1	1,1 2	0,5 0	0,7 8	34,83
	10 - 21	0,0 6	0,6 5	0,22 9	1,2 1	0,5 0	0,9 2	9,66
	21 - 44	0,0 0	0,3 2	0,00 4	1,2 4	0,5 0	0,9 6	24,08
	44 - 80	0,0 0	0,3 4	0,00 1	1,2 1	0,5 0	0,9 6	17,61
Mallorquin a	0 - 25	0,0 0	0,2 6	0,00 3	1,2 8	0,5 0	0,9 6	76,75
	25 - 37	0,0 0	0,2 3	0,00 3	1,2 6	0,5 0	0,9 8	100,00
	37 - 45	0,0 0	0,3 8	0,00 3	1,3 2	0,5 0	0,9 5	51,62
	45 - 80	0,0 0	0,8 9	0,07 0	1,3 4	0,5 0	0,9 9	30,57

Valores mínimos y máximo de IV de imágenes satelitales

Cuadro 15. Valores máximos y mínimos para cada Índice Vegetacional en los cuarteles.

Valor	NDVI	NDVIgreen	SAVI	SAVIgreen
Mínimo	0,163	-0,119	0,107	-0,066
Máximo	0,826	-0,013	0,596	-0,003

Estimación de IAF y FI mediante intercepción de radiación solar (Olivos)

A continuación, se presentan los valores de FI y IAF derivados de las mediciones de PAR, por medio de un ceptómetro lineal, durante el periodo de estudio.

El FI registrados en olivos (Cuadro 16), existe una gran diferencia entre cuarteles, esto se debe a la gran diferencia del estado de desarrollo de las plantaciones, como se puede visualizar en la Figura 40, y se evidencia la falta de desarrollo en estos cultivos, en Mallorca es menor al 5% y en el cuartel Mal Paso un 23% de cobertura, demostrando que el marco de plantación es muy extenso para este cultivo y en esta zona.

Cuadro 16. Valores de FI (%) en olivos, medidos en terreno mediante ceptómetro.

N° de Medición	Olivos									
	Mallorquina					Mal Paso				
FI	A1	A2	A3	Media	C.V. %	A1	A2	A3	Media	C.V. %
1	7,94	3,36	4,84	5,38	43,39	31,24	33,32	30,39	31,65	4,75
2	6,37	6,78	4,38	5,84	21,92	9,59	21,64	-	15,62	-
3	2,86	4,82	1,53	3,07	53,93	17,54	23,24	18,63	19,80	15,28
4	6,08	2,83	1,79	3,57	62,74	18,18	22,98	15,61	18,92	19,75
5	6,90	4,58	2,26	4,58	50,73	18,84	27,06	19,80	21,90	20,52
6	9,95	5,44	3,11	6,17	56,31	20,58	27,37	22,05	23,33	15,29
7	9,43	4,59	2,11	5,38	69,23	24,28	30,83	24,53	26,55	13,98
Media	7,07	4,63	2,86	4,85		20,04	26,63	21,84	22,54	

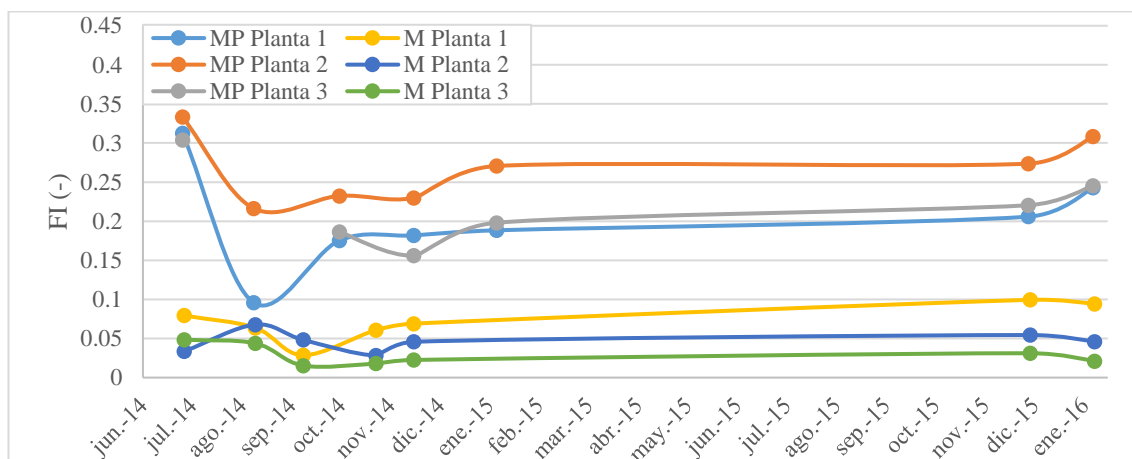


Figura 40. Valores de FI en olivos, mediante modelación de PAR, cuartel de Mal Paso (MP) y Mallorca (M).

Los valores de IAF en olivos (Cuadro 17), en general los individuos en estudios tienen un desarrollo en su área foliar en el periodo de análisis, además en la Figura 41, podemos evidenciar una oscilación en el IAF en el periodo de agosto hasta noviembre del 2014, no se puede saber si es un fenómeno normal de la estación, ya que no se obtuvieron mediciones en el año 2015. Respecto a los individuos cada cuartel, en Mal Paso los arboles no muestran una homogeneidad con una media 22% en el coeficiente de

variación, además un incremento del IAF general de 16% en el periodo de enero 2016, empero en el cuartel de Mallorcaquina existe una disminución del IAF en un 20%, debido a una poda general en el cuartel para dar forma de copa a los individuos y asimismo presentar una notoria heterogeneidad respecto a la canopia con un 55% de coeficiente de variación medio.

Cuadro 17. Valores de IAF en olivos, medidos en terreno mediante ceptómetro.

N° de Medición	Olivos									
	Mallorquina					Mal Paso				
IAF	A1	A2	A3	Media	C.V. %	A1	A2	A3	Media	C.V. %
1	0,46	0,18	0,29	0,31	46,10	1,74	1,82	1,60	1,72	6,43
2	0,33	0,39	0,22	0,31	26,73	0,89	1,33	-	1,11	-
3	0,15	0,29	0,09	0,18	56,72	1,07	1,39	1,18	1,21	13,28
4	0,38	0,15	0,11	0,21	68,65	1,22	1,67	1,08	1,32	23,06
5	0,51	0,30	0,17	0,33	53,94	1,22	1,84	1,33	1,46	22,54
6	0,71	0,33	0,20	0,41	63,54	1,40	1,82	1,40	1,54	15,80
7	0,60	0,28	0,12	0,33	73,14	1,66	2,09	1,62	1,79	14,46
Media	0,45	0,27	0,17	0,30		1,31	1,71	1,37	1,45	

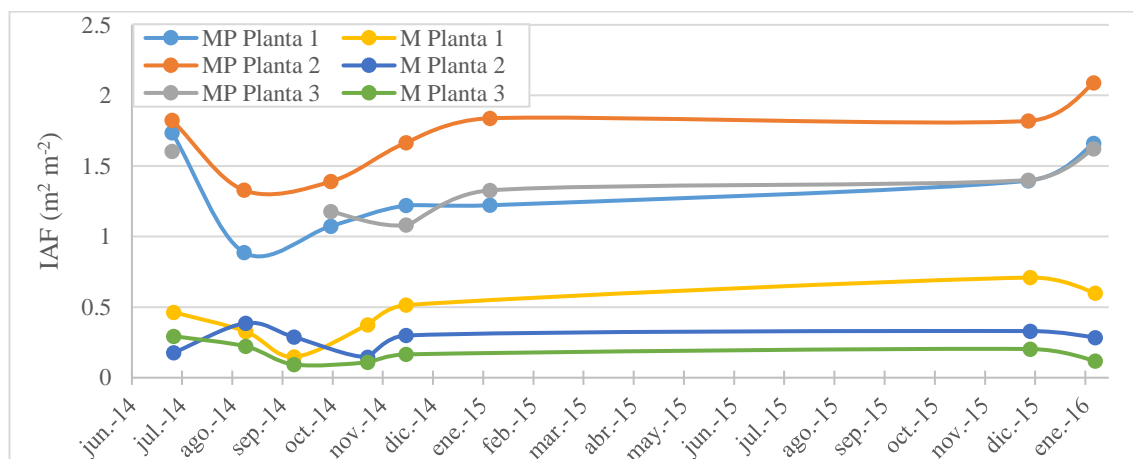


Figura 41. Valores de IAF en olivos, mediante modelación de PAR, cuartel de Mal Paso (MP) y Mallorcaquina (M).

El coeficiente de extinción ajustado (k), que se utilizó para olivos fue de 0,54. Indicando que en general los individuos en estudio tienen un similar comportamiento en la penetración de la radiación solar. Es sumamente importante mencionar que este valor es local.

Estimación de IAF y FI mediante intercepción de radiación solar (Uva pisquera)

Los resultados de FI y IAF, por medio de las mediciones de PAR, en el caso del FI registrados en uva pisquera (Cuadro 18), existe un comportamiento generalizado y una similitud entre las plantas, en la dinámica temporal el FI varía constantemente, este se debe a la fenología de la uva pisquera, con un follaje anual (Figura 42), esto se evidencia al presentar un 12% de cobertura en la etapa inicial, un 72% en pleno desarrollo y 42% en senescencia.

Cuadro 18. Valores de FI (%) en uva pisquera, medidos en terreno mediante ceptómetro.

N° de Medición	Uva pisquera Toledo							
	FI	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Media
1	13,85	7,73	12,30	13,64	13,61	11,04	12,03	19,65
2	22,50	11,08	23,19	30,37	22,09	25,28	22,42	28,26
3	30,57	17,28	32,40	43,96	35,06	31,84	31,85	27,06
4	44,61	29,09	49,41	61,83	51,45	41,46	46,31	23,65
5	61,23	45,82	67,32	78,52	70,07	49,74	62,12	20,09
6	73,12	50,39	89,40	82,68	81,67	57,35	72,43	21,32
7	75,80	82,03	91,67	87,63	88,82	66,27	82,04	11,66
8	32,78	38,16	23,85	54,17	68,58	35,28	42,13	38,69

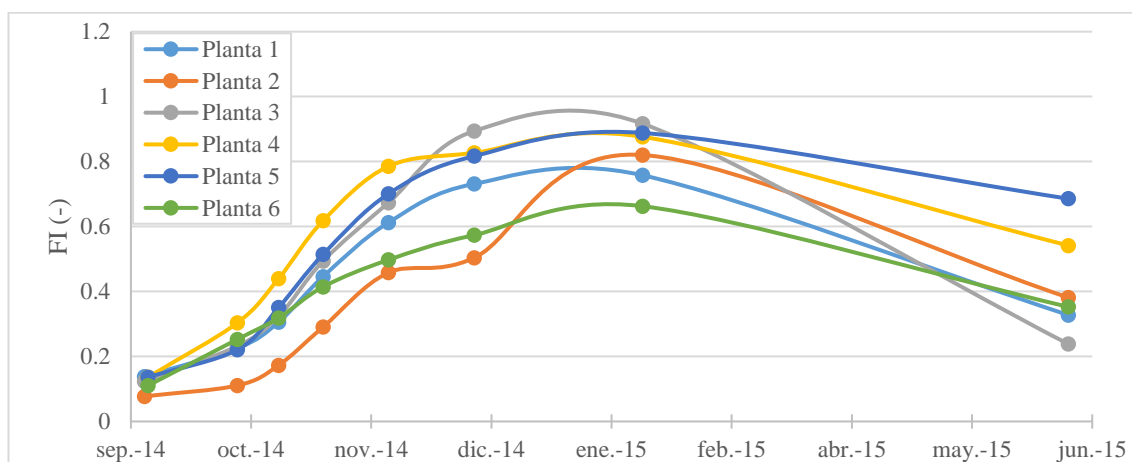


Figura 42. Valores de FI en uva pisquera, mediante modelación de PAR, cuartel Toledo.

Los valores de IAF uva pisquera, en general las plantas presentan curvas con un comportamiento similar, pero no todas tienen la misma de follaje variando en la amplitud de su curva fenológica, a pesar que contengan una alta cobertura (Figura 43). En el Cuadro 19. Valores de IAF en uva pisquera, medidos en terreno mediante ceptómetro., podemos ver los árboles presentan una mayor variación entre ellos, a medida que comienzan a brotar las hojas, produciendo que los cuarteles no sean homogéneos, esto se evidencia al presentar un 21% de variación en la etapa inicial, un 39% en pleno desarrollo y 54% en senescencia.

Cuadro 19. Valores de IAF en uva pisquera, medidos en terreno mediante ceptómetro.

N° de Medición	Uva pisquera						Media	C.V. %
	Toledo							
IAF	A1	A2	A3	A4	A5	A6		
1	0,23	0,12	0,20	0,22	0,23	0,18	0,20	21,03
2	0,38	0,16	0,41	0,54	0,39	0,46	0,39	32,21
3	0,55	0,29	0,60	0,87	0,68	0,63	0,60	31,70
4	0,93	0,53	1,07	1,45	1,14	0,86	1,00	31,07
5	1,40	0,93	1,68	2,25	1,79	1,06	1,52	32,20
6	1,89	1,11	3,23	2,57	2,46	1,27	2,09	39,20
7	2,05	2,56	3,70	3,06	3,20	1,62	2,70	28,70
8	0,58	0,70	0,40	1,14	1,68	0,67	0,86	54,69

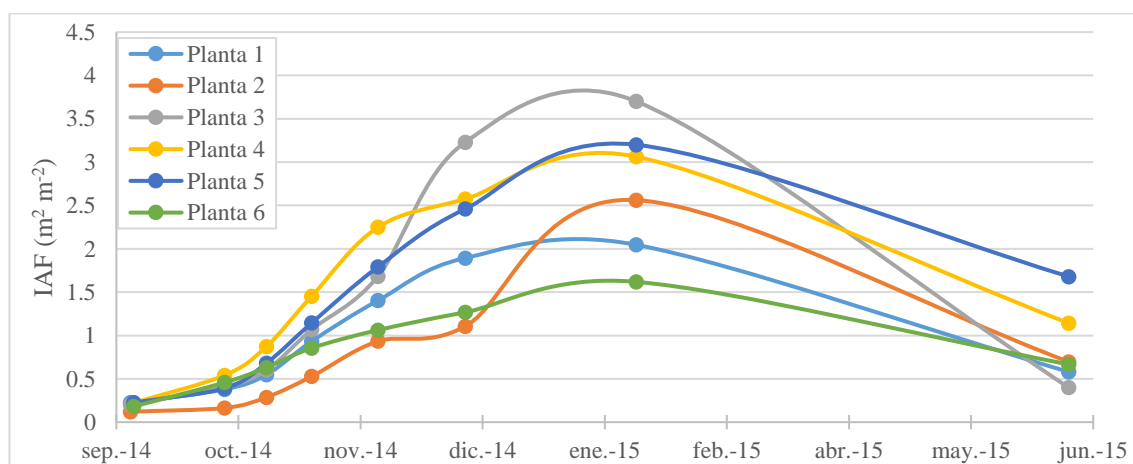


Figura 43. Valores de IAF en uva pisquera, mediante modelación de PAR, cuartel Toledo.

El coeficiente de extinción (k) ajustado fue de 0,69 para uva pisquera, un valor elevado demostrando que en general las plantas no presentan una dispersión en la penetración de la radiación solar.

Estimación de Kc, Kcbaj y Ke máximos (Olivos)

En el Cuadro 20. Valores medios de Kc, Kcb y Ke máximos, respecto a datos de terreno en los cuarteles de olivos., encontramos los valores de Kcmax, Kcbmax y Kemax para olivos, que nos muestra que en el periodo de estudio el Ke para ambos cuarteles mantiene un valor estable, sin mucha variación en los cuarteles, que su valor de coeficiente de variación no superaba el 7% en Mal Paso y un 3% en Mallorquina. Respecto al Kcb podemos ver que en el cuartel Mal Paso este tiene una capacidad transpirativa homogénea, escenario que cambia en el cuartel Mallorquina teniendo una mayor variación. En general esto se podría deber a los extensos marcos de plantación y la baja cobertura y un posible estrés salino, provocando una baja tasa de crecimiento del follaje, generando que la especie tenga un comportamiento de carácter lineal al mediano plazo (Figura 44), pero no se puede afirmar con certeza, ya que existe un vacío de mediciones en el año 2015.

Cuadro 20. Valores medios de Kc, Kcb y Ke máximos, respecto a datos de terreno en los cuarteles de olivos.

Cuartel	N° de Mediciones	Kcbaj		Ke		Kc	
		Media	C.V. %	Media	C.V. %	Media	C.V. %
Mal Paso	1	0,48	2,12	0,13	2,20	0,60	1,25
	2	0,41	7,85	0,15	7,33	0,57	3,72
	3	0,42	4,86	0,15	3,77	0,57	2,63
	4	0,43	8,09	0,15	4,61	0,58	4,83
	5	0,45	7,56	0,14	5,76	0,59	4,33
	6	0,46	5,21	0,14	4,65	0,60	2,91
	7	0,45	5,74	0,14	3,82	0,60	3,46
Mallorquina	1	0,26	13,39	0,17	2,47	0,43	7,00
	2	0,26	7,86	0,17	1,36	0,43	4,17
	3	0,22	11,73	0,18	1,71	0,40	5,77
	4	0,23	15,72	0,18	2,32	0,41	7,90
	5	0,26	15,99	0,18	2,44	0,44	8,57
	6	0,28	20,51	0,17	3,70	0,45	11,25
	7	0,26	21,85	0,17	3,93	0,44	11,52

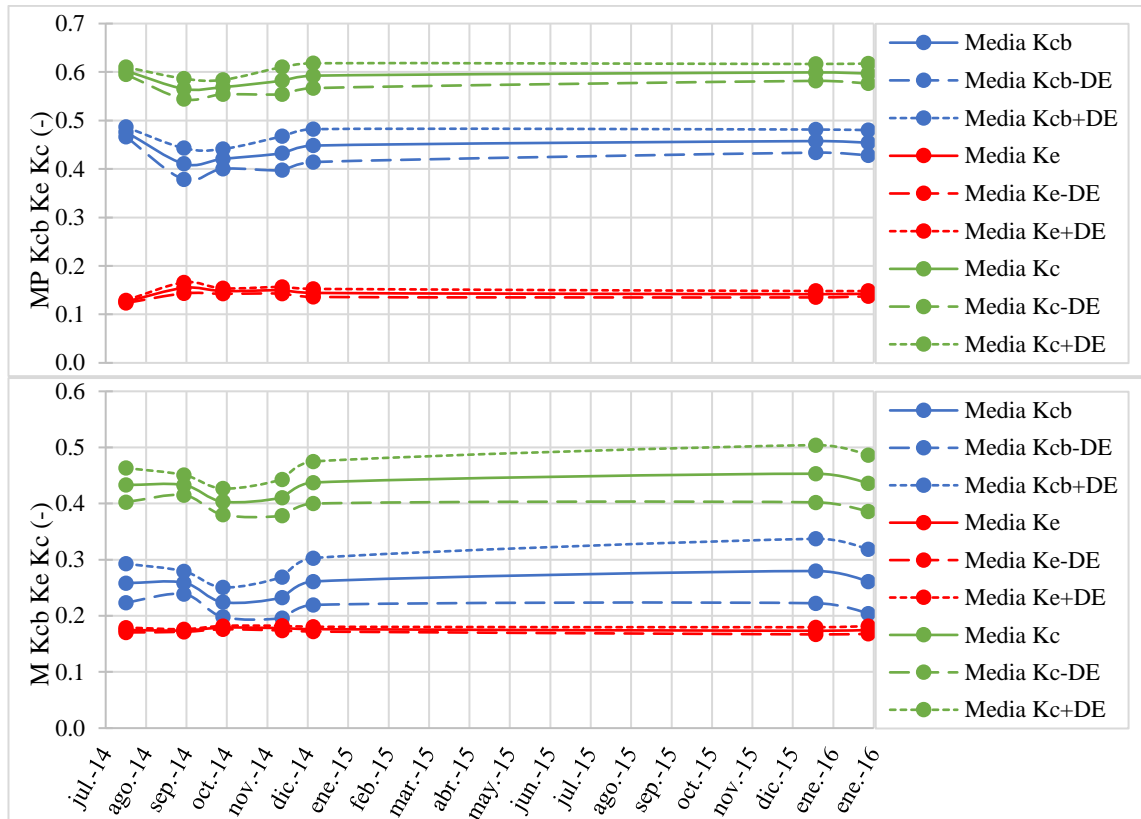


Figura 44. Dinámica temporal para olivos de las medias de K_{cmax} , K_{cbmax} y K_{emax} , por el método Dual FAO, cuartel de Mal Paso (MP) y Mallorca (M).

Estimación de Kc, Kcbaj y Ke máximos (Uva pisquera)

Los resultados de los Kcmax, Kcbmax y kemax se presentan en el Cuadro 21. Valores medios de Kc, Kcb y Ke máximos, respecto a datos de terreno en los cuarteles de Toledo. que representa a los coeficientes potenciales medios para toda la especie. En la Figura 45 se puede evidenciar que, entre agosto a septiembre del 2014, el Ke no presenta variaciones en todo el predio, la baja cobertura no produciría una influencia en la pérdida de agua por evaporación. Luego en octubre del 2014 y enero 2015, periodo cuando el follaje se encuentra en pleno desarrollo, existe una diferencia distintiva entre los Kcb y Ke de los árboles generando un aumento notorio en el coeficiente de variación para el periodo de estudio, pero el Kc muestra todo lo contrario, una estabilidad, por lo cual se puede inferir que a pesar de que exista una variación entre los individuos de esta especie, la necesidad hídrica es homogénea para los cuarteles.

Cuadro 21. Valores medios de Kc, Kcb y Ke máximos, respecto a datos de terreno en los cuarteles de Toledo.

N° de Mediciones	Kcbaj		Ke		Kc	
	Media	C.V. %	Media	C.V. %	Media	C.V. %
1	0,23	6,93	0,30	0,00	0,53	3,00
2	0,30	14,55	0,30	0,00	0,60	7,24
3	0,36	15,60	0,30	0,00	0,66	8,52
4	0,46	15,13	0,27	13,63	0,73	5,91
5	0,55	13,53	0,20	32,94	0,75	0,99
6	0,61	14,71	0,15	56,02	0,75	1,01
7	0,67	8,73	0,10	53,26	0,76	0,95
8	0,42	24,23	0,27	20,04	0,69	7,86

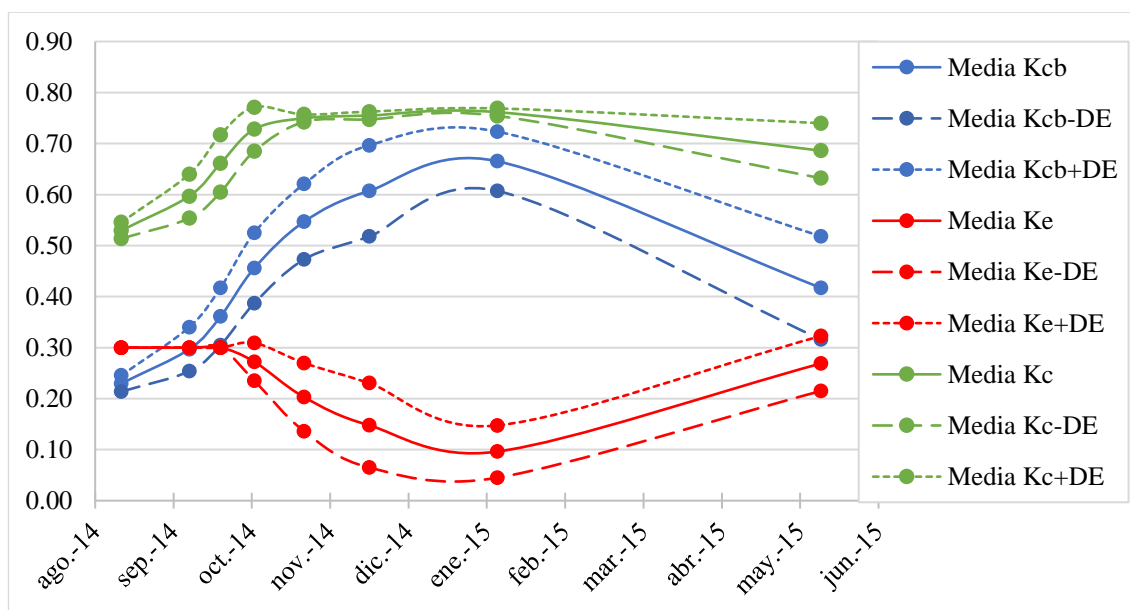


Figura 45. Dinámica temporal para uva pisquera de Kc, Kcbaj y Ke, por el método Dual FAO, cuartel Toledo.

Estimación de curva de ajuste para Índice Vegetacional espectral

Se realizó una curva de ajuste polinomial de grado dos (ecuación 43), para estimar el valor del índice vegetacional el día correspondiente para cada medición en terreno con ceptómetro. Todo esto para poder realizar una correlación lineal entre los datos. El Cuadro 22, indica los valores de los coeficientes de las curvas de ajuste para cada índice y su coeficiente de correlación. Además, podemos ver que el índice NDVI obtuvo mejores resultados para el cultivo de uva pisquera, pero el índice de SAVIgreen pondero una media de un $R^2 = 0,87$, es porque este índice fue escogido para realizar el análisis espacial de las variables IAF y FI.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (\text{Ec. 43})$$

Ecuación 43. Donde y es la variable dependiente representando el valor del índice vegetacional para un día, la variable x es el día correspondiente a la medición en terreno.

Cuadro 22. Coeficientes de curva de ajuste, para cada índice vegetacional espectral.

Predio	Coeficiente	Índice Vegetacional			
		NDVI	NDVIgreen	SAVI	SAVIgreen
Uva pisquera	a	-3,069	-0,505	-2,268	-0,286
	b	0,0194	0,0023	0,0142	0,0014
	c	-0,000024	-0,000003	-0,000018	-0,000002
	R^2	0,90	0,81	0,89	0,83
Olivo - Mallorca	a	1,167	-0,001	0,592	0,106
	b	-0,0071	-0,0009	-0,0037	-0,0012
	c	0,000014	0,000002	0,000008	0,000002
	R^2	0,69	0,93	0,89	0,92
Olivo - Mal Paso	a	-0,277	-0,307	0,612	-0,256
	b	0,0025	0,0007	-0,0014	0,0008
	c	-0,000002	-0,000001	0,000001	-0,000001
	R^2	0,20	0,31	0,29	0,88
	Media R^2	0,60	0,68	0,69	0,87

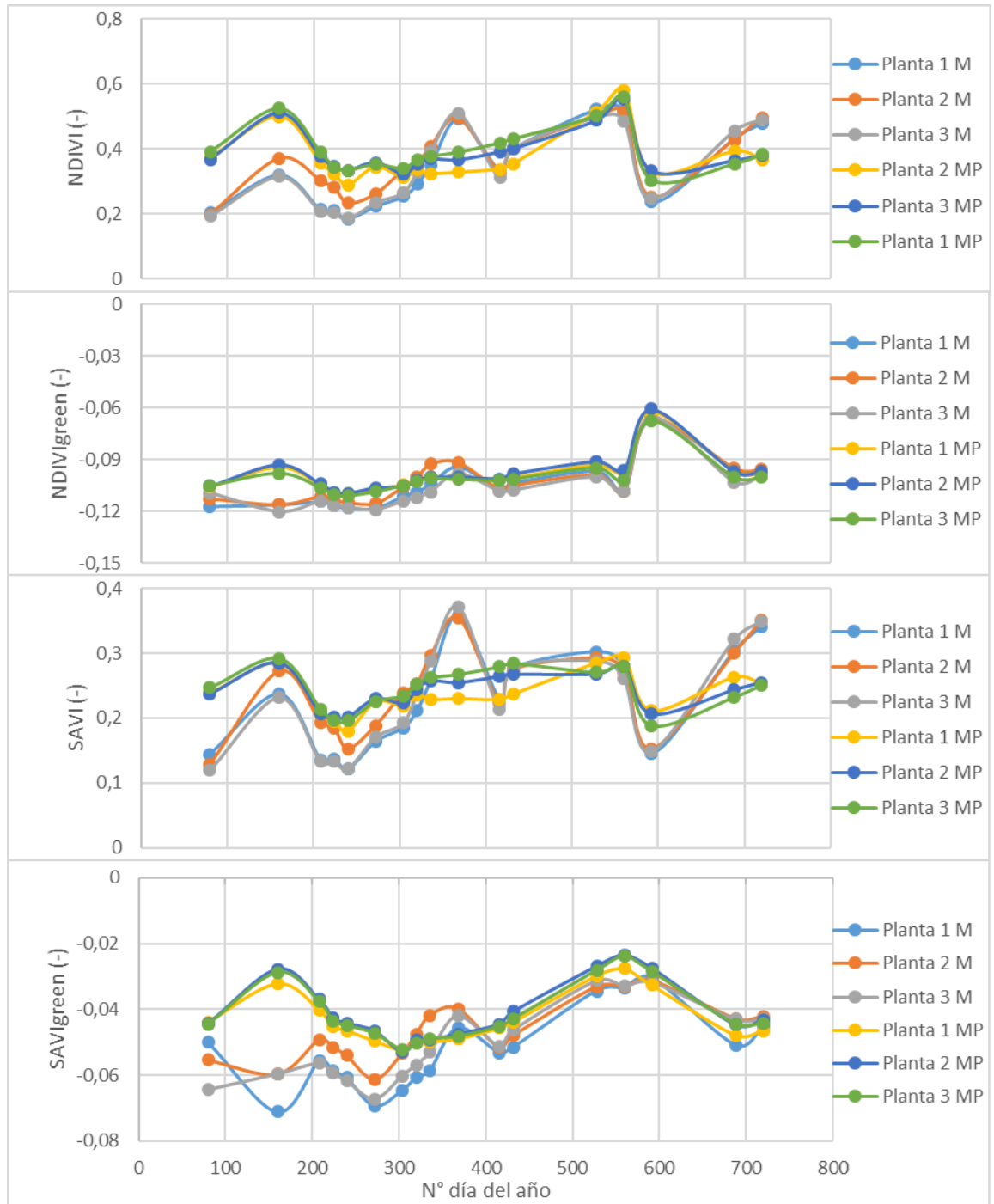


Figura 46. Dinámica temporal de índices vegetacionales para olivo, mediante imágenes satelitales.

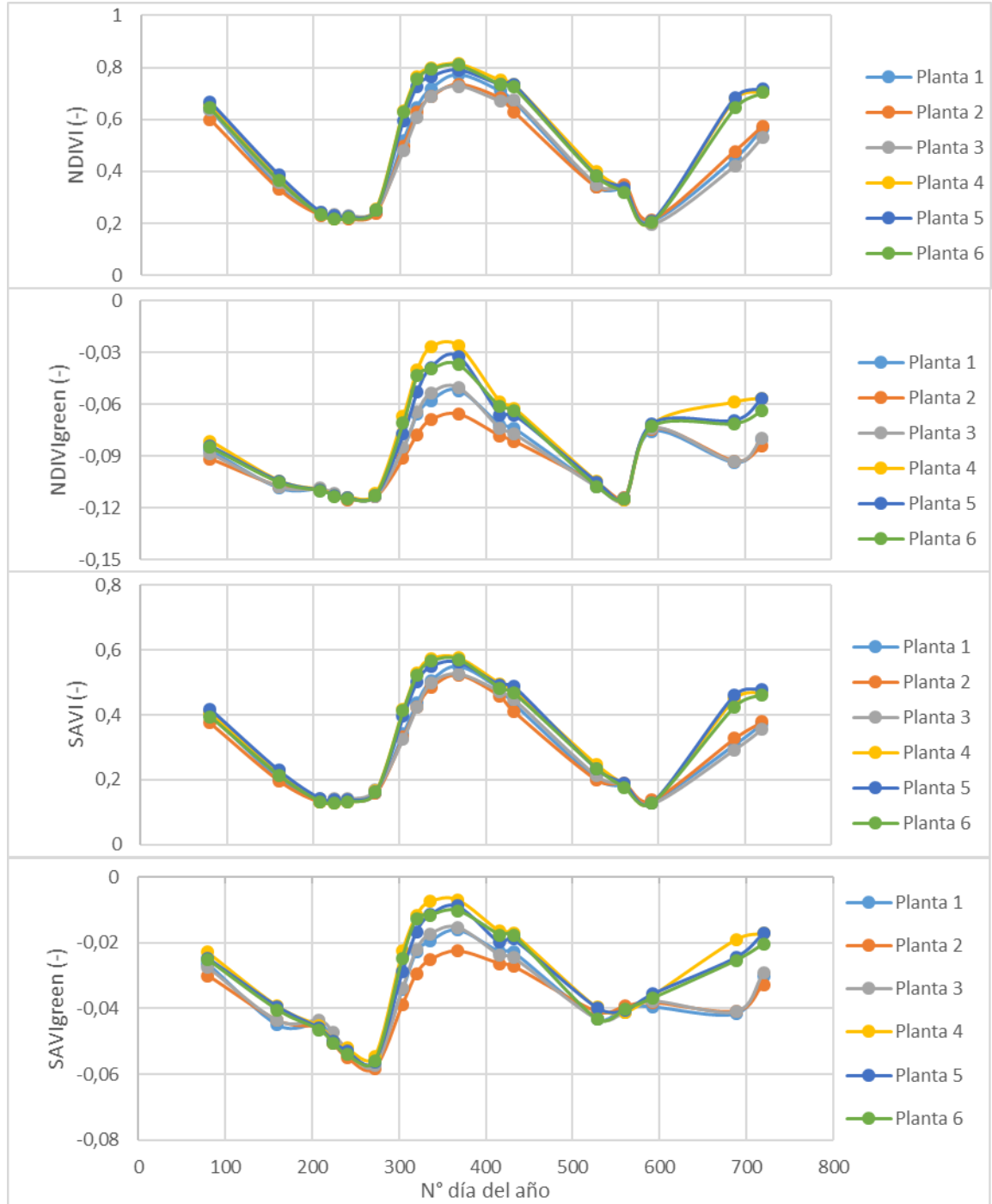


Figura 47. Dinámica temporal de índices vegetacionales para uva pisquera, mediante imágenes satelitales.