# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



## FACULTAD DE CIENCIAS



# MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS

# ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ACTUAL (ET<sub>a</sub>) PARA LA COBERTURA NATURAL EN UNA ZONA SEMIÁRIDA MEDITERRÁNEA: ESTUDIO DE CASO LA SUBCUENCA EL MOGOR, B.C., MÉXICO

Tesis Para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta Eduardo González Manzano

Ensenada, Baja California, México Noviembre 2023

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

## FACULTAD DE CIENCIAS

## MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS

# "ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ACTUAL (ET<sub>a</sub>) PARA LA COBERTURA NATURAL EN UNA ZONA SEMIÁRIDA MEDITERRÁNEA: ESTUDIO DE CASO LA SUBCUENCA EL MOGOR, B.C., MÉXICO"

TESIS

Para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta Eduardo González Manzano

Aprobado por

Dr. Francisco Jog oro Guerrero Director

Dra. Mariana Villada Canela

Sinodal

Dr. Luis Walter Daesslé Heuser

Sinodal

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo Sinodal

### Resumen

El presente trabajo de tesis se centra en el desarrollo y validación de modelos predictivos para calcular el coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) y la evapotranspiración actual (ET<sub>a</sub>) de la vegetación natural dominada por chaparral en una región semiárida Mediterránea. El estudio se realizó en la porción central de la subcuenca El Mogor, localizada en el Valle de Guadalupe en B.C., México, durante el periodo de junio 2015 a septiembre 2016. Se integraron en la metodología propuesta por la FAO-56 datos climáticos, de humedad del suelo y de percepción remota (índices de vegetación, [VI] para realizar el cálculo los coeficientes de estrés hídrico del suelo (K<sub>s</sub>), de transpiración de la vegetación (K<sub>cb</sub>) y evaporación de agua del suelo (K<sub>e</sub>) que conforman el cálculo de K<sub>c</sub>. Posteriormente, mediante el producto de K<sub>c</sub> y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), se realizó la estimación de la ET<sub>a</sub> calculada (ET<sub>a cal</sub>). Finalmente se evaluaron estadísticamente los resultados de la  $ET_{a\ cal}$  con los de la  $ET_{a}$  medida ( $ET_{a\ med}$ ) por una estación Eddy Covarianza localizada a ~ 2.8 km de la zona de estudio a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) producto de los modelos lineales. El método se aplicó en ambos sitios (porción central de la subcuenca El Mogor y en el sitio de la estación Eddy Covarianza). Se llevó a cabo los cálculos de ET<sub>a cal</sub> mediante dos metodologías que involucran ET<sub>o</sub>, la primera emplea la metodología propuesta por Allen et al. (1998) y la segunda sigue una estructura similar, cuya diferencia es la omisión de K<sub>e</sub>. La segunda opción tuvo mejores resultados al evaluar el producto final (Kc \* ETo), teniendo una mayor similitud con ET<sub>a med</sub>. Los resultados revelaron que el Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) presentó fuertes correlaciones con K<sub>c</sub>, realizando la omisión de K<sub>e</sub> en el cálculo de  $K_c$  calculando un  $R^2$  en el rango de 0.74 – 0.96. Al evaluar el grado de asociación entre  $ET_{a cal}$  con  $ET_{a med}$  se observa una asociación positiva moderada a fuerte ( $R^2$  en el rango de 0.65 – 0.78) omitiendo Ke. Se podría esperar que ETa cal incluyendo Ke tendría un mejor ajuste, sin embargo, sobreestima los valores de ET<sub>a cal</sub> en un 126%, mientras que omitiendo Ke subestima los valores en un 5%. Se concluye que los modelos evaluados omitiendo K<sub>e</sub> pueden ser válidos para calcular K<sub>c</sub> mediante el NDRE en la zona de estudio, así como el cálculo de ET<sub>a</sub> y facilitar su aproximación. Este estudio aporta conocimientos regionales valiosos para la estimación de la ET<sub>a</sub> reduciendo el número de variables para su cálculo (NDRE y ET<sub>0</sub>). Considerando los hallazgos del presente trabajo de investigación se pueden ofrecer algunas recomendaciones de manejo como el monitoreo de la salud vegetal, conservación y restauración de ecosistemas, planificación del uso de tierra, evaluación del cambio climático, uso eficiente del agua y en general la gestión del agua. Sin embargo, es importante destacar que los resultados no reemplazan a la ET<sub>a</sub> medida en la estación Eddy Covarianza, sino que la complementan con el propósito de estimar la ET<sub>a</sub> en áreas donde no se disponga de datos.

**Palabras claves:** Climatología, Humedad en el suelo, Coeficiente de vegetación, Percepción Remota, FAO-56, Evapotranspiración actual, Ecohidrología.

### Abstract

The present thesis focuses on developing and validating predictive models to calculate the vegetation coefficient (K<sub>c</sub>) and current evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) of natural vegetation dominated by chaparral in a semi-arid Mediterranean region. The study was conducted in the central portion of the El Mogor subwatershed, located in the Guadalupe Valley in B.C., Mexico, from June 2015 to September 2016. Climate, soil moisture, and remote sensing data (vegetation indices, [VI]) were integrated into the methodology proposed by FAO-56 to perform the calculation of soil water stress coefficients (K<sub>s</sub>), vegetation transpiration (K<sub>cb</sub>) and soil water evaporation (K<sub>e</sub>) that make up the calculation of K<sub>c</sub>. Subsequently, using the product of K<sub>c</sub> and the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), the calculated ET<sub>a</sub> (ET<sub>a cal</sub>) was estimated. Finally, the results of the ET<sub>a cal</sub> were statistically evaluated with those of the measured  $ET_a$  ( $ET_{a med}$ ) by an Eddy Covariance station located ~ 2.8 km from the study area through the coefficient of determination  $(\mathbb{R}^2)$  product of the linear models. The method was applied at both sites (the El Mogor sub-basins central portion and the Eddy Covarianza station site). The ET<sub>a cal</sub> calculations were carried out through two methodologies where both involve ET<sub>o</sub>, the first involves the methodology proposed by Allen et al. (1998) and the second follows a similar structure, the difference being the omission of Ke. The second option had better results when evaluating the final product (K<sub>c</sub> \* ET<sub>o</sub>), having a greater similarity with ET<sub>a med</sub>. The results revealed that the Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) presented strong correlations with K<sub>c</sub>, making the omission of K<sub>e</sub> in the estimation of K<sub>c</sub> calculate an R<sup>2</sup> in the range of 0.74 - 0.96. When evaluating the degree of association between ET<sub>a cal</sub> with ET<sub>a med</sub>, a moderate to strong positive association was observed (R2 in the range of 0.65 - 0.78), omitting K<sub>e</sub>. Based on the FAO-56 method, we expect that ET<sub>a cal</sub> including K<sub>e</sub> would have a better fit; however, it overestimates ET<sub>a cal</sub> values by 126%, while omitting K<sub>e</sub> underestimates values by 5%. It is concluded that the models evaluated omitting  $K_e$  can be valid for calculating  $K_c$  by NDRE in the study area and calculating ETa and facilitating its approximation. This study provides valuable regional knowledge for ET<sub>a</sub> estimation by reducing the number of variables for its calculation (NDRE and ET<sub>o</sub>). Considering the findings of this research work, some management recommendations can be offered such as monitoring plant health, conservation and restoration of ecosystems, land use planning, evaluation of climate change, efficient use of water and in general the management of the water. However, it is essential to note that the results do not replace ET<sub>a</sub> measured at the Eddy Covariance station but complement it to estimate ET<sub>a</sub> in areas where data are unavailable.

**Key words:** Climatology, Soil moisture, Vegetation coefficient, Remote Sensing, FAO-56, Actual Evapotranspiration, Ecohydrology.

# Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres Gabriela Manzano y Fernando González, que siempre me han apoyado y han sido un ejemplo de constancia y perseverancia para mí.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante dos años para la realización del estudio de posgrado.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y específicamente a la Facultad de Ciencias por darme la oportunidad de formar parte del cuerpo estudiantil y por la educación recibida.

A los miembros de mi comité de tesis, al Dr. Luis Walter Daesslé Heuser, al Dra. Mariana Villada Canela y al Dr. Rodrigo Méndez Alonzo por sus sugerencias, críticas constructivas a lo largo de este trabajo. Especialmente agradezco al Dr. Francisco José Del Toro Guerrero por su apoyo durante todo este trayecto por sus valiosas recomendaciones, contribuciones para el enriquecimiento de mi trabajo y la motivación diaria que me daba.

Al Dr. Stephen Bullock por facilitarme los datos climatológicos de la estación de flujo turbulento ubicada en El Mogor. A mis profesores que me impartieron clases durante la maestría y me permitieron adquirir los conocimientos necesarios para concluir con mis estudios de posgrado.

A Natalia Badan, por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de posgrado en sus tierras. A Rigo Ceja y el personal del Rancho El Mogor por las facilidades otorgadas en mis salidas a campo.

A mis amigos y compañeros, con quienes compartí momentos muy gratos, grandes conversaciones y mucha diversión: Noemi Salgado, Estefanía Sandoval, Emilio Piña, Diego Toscano y a otros tantos que formaron parte importante de estancia en la maestría. A mi equipo de triatlón Momentum que fueron y son parte importante de mi formación: Héctor Ayón, Fernando Lujan, Nayeli Chacón.

Finalmente quiero agradecer a mi papá Fernando, mi mamá Gabriela, mi hermana Fernanda y a Kari que siempre me apoyaron y confiaron en mí para comenzar y finalizar mis estudios de posgrado.

Símbolo o acrónimo	Significado y unidades				
a <sub>0</sub>	Coeficiente de extinción [-]				
a <sub>1</sub>	Valor del índice de vegetación (VI) correspondiente al suelo desnudo [-]				
a <sub>2</sub>	Valor del índice de vegetación cuando el índice de área foliar (LAI) tiende				
	a infinito o a la saturación [-]				
D	Agotamiento de la humedad en la zona radicular [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]				
De	Lámina acumulada de evaporación [mm]				
Dr	Relación de agotamiento de humedad en la zona radicular [-]				
EEC	Estación Eddy Covarianza				
ECL	Estación climatológica				
EIV	Etapa inicial de la vegetación [-]				
EDV	Etapa de desarrollo de la vegetación [-]				
EMV	Etapa de mediados de la vegetación [-]				
ETV	Etapa tardía de la vegetación [-]				
ET	Evapotranspiración [mm día <sup>-1</sup> ]				
ETa	Evapotranspiración actual [mm día <sup>-1</sup> ]				
$ET_{a \ cal}$	Evapotranspiración actual calculada [mm día-1]				
ET <sub>a med</sub>	Evapotranspiración actual medida [mm día <sup>-1</sup> ]				
ETo	Evapotranspiración de referencia [mm día <sup>-1</sup> ]				
e(act)	Presión de vapor promedio [k Pa]				
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la				
	Agricultura				
h	Altura promedio de la vegetación [m]				
K <sub>c</sub>	Coeficiente de vegetación [-]				
K <sub>c max</sub>	Valor máximo del coeficiente de vegetación [-]				
K <sub>c min</sub>	Valor mínimo del coeficiente de vegetación [-]				
K <sub>cb</sub>	Coeficiente de transpiración de la vegetación [-]				
K <sub>cb</sub> full	Coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la				
	vegetación [-]				
Kcb, h	K <sub>cb</sub> para vegetación con cobertura completa				
Ke	Coeficiente de evaporación del suelo [-]				
K <sub>r</sub>	Coeficiente de reducción de la evaporación en el suelo [-]				
Ks	Coeficiente de estrés hídrico [-]				
LAI	Indice de área foliar [m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ]				
N	Duración máxima de la insolación [h]				
MSAVI	Indice de vegetación ajustado al suelo modificado [-]				
NDRE	Indice de diferencia normalizada de borde rojo [-]				
NDVI	Indice de vegetación de diferencia normalizada [-]				
n 	Horas de sol brillante [h]				
REW	Agua fácilmente evaporable [%]				
RH <sub>min</sub>	Humedad relativa mínima diaria [%]				
RH <sub>max</sub>	Humedad relativa máxima diaria [%]				
RH <sub>med</sub>	Humedad relativa media diaria [%]				
R <sub>s</sub>	Radiación solar diaria [W m <sup>-2</sup> ]				

# Lista de símbolos y acrónimos

Símbolo o acrónimo	Significado y unidades
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo [-]
SP	Sonda de perfil
SR	Sensores remotos
TAW	Agua total disponible [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
Tdew	Temperatura media del punto de rocío [°C]
TEW	Agua total evaporable [mm]
<b>u</b> <sub>2</sub>	Velocidad promedio del viento a 2 metros de altura [m s <sup>-1</sup> ]
VI	Índice de vegetación
θ	Contenido de agua en el suelo [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
$\theta_{fc}$	Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
$\theta_{wp}$	Contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente [m <sup>3</sup>
	m <sup>-3</sup> ]
ρ	Densidad aparente [g cm <sup>-3</sup> ]

# Tabla de contenido

Resumen	II
Abstract	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Lista de símbolos y acrónimos	VI
Tabla de contenido	VIII
Listado de Figuras	X
Listado de Tablas	XII
Listado de Anexos	XIII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Glosario	6
1.3. Justificación	10
1.4. Hipótesis	11
1.5. Preguntas de investigación	11
1.6. Objetivos	
1.6.1. Objetivo general	
1.6.2. Objetivos particulares	
Capítulo 2. Metodología	13
2.1. Sitio de estudio	13
2.2. Marco Teórico	14
2.3. Metodología de la FAO-56	17
2.3.1. Coeficiente de estrés hídrico (K <sub>s</sub> )	17
2.3.2. Coeficiente de transpiración en el máximo desarrollo de la vegetación ( $K_{cbful}$ valor máximo del coeficiente de vegetación ( $K_{cmax}$ )	n) y el 
2.3.3. Coeficiente de transpiración de la vegetación (K <sub>cb</sub> )	19
2.3.4. Coeficiente de reducción de la evaporación del suelo (K <sub>r</sub> )	
2.3.5. Coeficiente de la evaporación del agua en el suelo (K <sub>e</sub> )	
2.3.6. Coeficiente de vegetación (K <sub>c</sub> )	
2.3.7. Evapotranspiración de referencia, Penman – Monteith (ET <sub>o</sub> )	
2.3.8. Evapotranspiración actual calculada (ET <sub>a cal</sub> )	
2.4. Propiedades del suelo	
2.4.1. Sensores de humedad en el suelo	

2.4.2. Contenido de agua en el suelo ( $\theta$ )	
2.4.3. Textura del suelo	
2.5. Datos climáticos y de la vegetación	
2.5.1. Altura de la vegetación	
2.6. Información de teledetección	
2.6.1. Índices de vegetación	
2.6.2. Procesamiento de las imágenes satelitales	39
2.6.3. Índice de área foliar (LAI)	
2.7. Análisis estadísticos	
Capítulo 3. Resultados	
3.1. Variables climáticas	
3.2. Propiedades físicas del suelo	44
3.3. Análisis de la vegetación	47
3.3.1. Evaluación del Índice de Área Foliar	50
3.4. Estimación del coeficiente de vegetación (Kc)	
3.5. Evaluación del modelo estadístico predictivo	56
3.6. Evaluación de la evapotranspiración actual calculada	57
Capítulo 4. Discusión	59
4.1. Índices de vegetación	59
4.2. Exclusión del coeficiente de evaporación del agua en el suelo en el cálculo o de vegetación	lel coeficiente 60
4.3. Modelo predictivo para el cálculo del coeficiente de vegetación	62
Capítulo 5. Recomendaciones de Manejo	
Capítulo 6. Conclusiones	66
Literatura citada	67
Anexos	74

## Listado de Figuras

<b>Figura 1.</b> (a) Macrolocalización de la subcuenca El Mogor (SEM); (b) localización del sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) y del Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC)
<b>Figura 2.</b> Flujo de trabajo. Los recuadros de color rojo muestran las principales fuentes de datos utilizadas. Los recuadros azules indican los coeficientes calculados para la estimación de K <sub>c</sub> . Los recuadros amarillos muestran las variables requeridas para estimar $ET_{a \ cal}$ . Los recuadros verdes representan a la $ET_{a \ med}$ y la validación de $ET_{a \ cal}$
<b>Figura 3.</b> Coeficiente de transpiración en las etapas de crecimiento de la vegetación. Esquema tomado de Allen et al. (1998)
<b>Figura 4.</b> (a) Localización del sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) y del Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC); (b) localización de los puntos de recolecta de muestras de suelo en el sitio LHC; (c) localización de los puntos de recolecta de muestras de suelo en el sitio EEC. SEM representa a la subcuenca El Mogor; SP es la sonda de perfil; ECL representa a la estación climática Davis y PRMS son los puntos de recolecta de muestras de suelo
Figura 5. Relación entre el contenido de agua del suelo y la textura del suelo. Modificado de Allen et al. (1998)
<b>Figura 6.</b> (a) Muestreador de núcleo dividido armado; (b) muestreador de núcleo dividido con el martillo deslizante enroscado; (c) aplicación del método de muestreo; (d) recipiente plástico y su colocación en el muestreador de núcleo dividido
<b>Figura 7.</b> Método de muestreo y técnica de procesado de las muestras de suelo. (a) Secado de las muestras de suelo al aire libre; (b) pesado de las muestras de suelo; (c) preparación de las muestras de suelo; (d) saturación de las muestras de suelo; (e) pesado de la muestra saturada; (f) proceso de infiltración-percolación de las muestras de suelo
<b>Figura 8.</b> (a) Muestra de suelo cuarteada; (b) tamices utilizados; (c) separación del suelo por malla; (d) agitador digital para partículas gruesas con sus respectivos tamices
Figura 9. (a) Medida de la altura de la vegetación natural; (b) acercamiento a la regla de PVC. 36
<b>Figura 10.</b> (a) Precipitación (P) y evapotranspiración de referencia medida (ET <sub>o med</sub> ) diaria; (b) P y ET <sub>o med</sub> mensual estimadas por la estación climática Davis. P está representada por barras azules, ET <sub>o med</sub> por la línea negra continua y el promedio de ET <sub>o med</sub> (diaria y mensual) está representada por la línea punteada negra
<b>Figura 11.</b> (a) Contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta$ ) y precipitación (P) diaria medidos durante el periodo de estudio en el laboratorio de hidrología de campo (LHC;) y (b) la estación Eddy Covarianza (EEC). $\theta$ representado por línea negra, P representada por barras azules, el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ) y en el punto de marchitez permanente ( $\theta_{wp}$ ) representados por la línea discontinua negra y gris, respectivamente

**Figura 12.** Diagrama triangular de la clasificación de la textura de suelo propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). La línea roja y línea azul indican la

clasificación del suelo en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC), respectivamente
<b>Figura 13.</b> (a) Variación de los índices de vegetación en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (b) en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) para las fechas disponibles de RapidEye. 50
Figura 14. (a) Variación del Índice de Área Foliar (LAI) en el LHC y (b) en el EEC para las imágenes satelitales RapidEye disponibles
<b>Figura 15.</b> (a) Coeficiente de estrés hídrico (K <sub>s</sub> ) y variación del contenido de agua en el suelo ( $\theta$ ) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (b) en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) durante el periodo de Jun 2015 a Sep 2016. Los puntos azules representan las fechas de imágenes satelitales disponibles (ISD) de RapidEye
<b>Figura 16.</b> (a) Variación del coeficiente de transpiración de la vegetación ( $K_{cb}$ ) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (b) en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC); (c) coeficiente de evaporación ( $K_e$ ) en el LHC y (d) en la EEC. EIV, EDV, EMV y ETV representan la etapa inicial, de desarrollo, de mediados y tardía de la vegetación, respectivamente
<b>Figura 17.</b> Variación del coeficiente de vegetación (K <sub>c</sub> ) en el LHC y en el sitio de la EEC. (a y c) metodología propuesta por Allen et al. (1998); (b y d) omitiendo K <sub>e</sub>
<b>Figura 18.</b> Modelo predictivo del coeficiente de vegetación en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la Estación Eddy Covarianza (EEC). (a y d) Regresión lineal de NDRE y K <sub>c-R</sub> (LHC, EEC); (b y e) regresión lineal de NDRE y K <sub>c-G</sub> (LHC, EEC); (c y f) regresión lineal de NDRE y K <sub>c-C-M</sub> (LHC, EEC)
<b>Figura 19.</b> $(a - c)$ Evaluación de la $ET_{a \ cal}$ con la $ET_{a \ med}$ en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (d – f) en el sitio de la Estación Eddy Covarianza (EEC)
<b>Figura 20.</b> Modelos de regresión lineal entre la evapotranspiración actual medida ( $ET_{a med}$ ) y la evapotranspiración actual calculada ( $ET_{a cal}$ ). (a y c) aplicando la metodología propuesta por Allen et al. (1998); (b y d) omitiendo K <sub>e</sub> . La línea discontinua naranja representa los valores ideales que debería de tomar el modelo

# Listado de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Número, tamaño de los tamices y la clasificación de la textura del suelo (Wentworth,1922)
<b>Tabla 2</b> Fechas de las imágenes RapidEye disponibles y descargadas en el periodo de estudio (Jun2015 - Sep 2016) en el Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC) y en la Estación EddyCovarianza (EEC)
<b>Tabla 3.</b> Valor y criterios del coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) (Ferrero, 2020)
<b>Tabla 4.</b> Análisis textural del suelo en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en elsitio de la estación Eddy Covarianza (EEC)
<b>Tabla 5.</b> Altura de los arbustos presentes alrededor de cada punto de muestreo en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC)

## Listado de Anexos

Anexo A.	Información	de la misión	RapidEye (	modificada	de Coffer	et al.,	2020 y	Planet,	2016).
									74

**Anexo C.** Índices de Área Foliar (LAI) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la estación Eddy Covarianza (EEC) para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye. LAI<sub>R</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Rodríguez-Moreno y Bullock, (2013), LAI<sub>G</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Galvincio et al., (2013), LAI<sub>C-M</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Galvincio et al., (2013), LAI<sub>C-M</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Galvincio et al., (2013), LAI<sub>C-M</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Galvincio et al., (2013), LAI<sub>C-M</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Galvincio et al., (2013), LAI<sub>C-M</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Clemente-Machado, (2014).

Anexo G. Valores del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la EEC para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye. K<sub>c-R</sub>, K<sub>c-G</sub> y K<sub>c-C-M</sub> es el coeficiente de vegetación calculado a partir del índice de área foliar propuesto por Rodríguez-Moreno y Bullock (2013), Galvincio et al. (2013) y Clemente-Machado (2014) respectivamente.

**Anexo H.** Valores del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la estación Eddy Covarianza (EEC) para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye omitiendo el coeficiente de evaporación de agua en el suelo (K<sub>e</sub>). K<sub>c-R</sub>, K<sub>c-G</sub> y K<sub>c-C-M</sub> es el coeficiente de vegetación calculado a partir del índice de área foliar propuesto por Rodríguez-Moreno y Bullock (2013), Galvincio et al. (2013) y Clemente-Machado (2014) respectivamente.

### Capítulo 1. Introducción

El agua no se distribuye de forma homogénea en la superficie terrestre; en algunas regiones abunda de manera notable, mientras que en otras su presencia es prácticamente inexistente. En áreas limitadas hidrológicamente, la precipitación representa el suministro natural de agua más importante (Cotler-Ávalos et al., 2010) y la cantidad de agua de lluvia se vincula con el tipo de clima (Ayyoub et al., 2017). Actualmente, las zonas áridas y semiáridas cubren el 41% de la superficie terrestre (FAO, 2020) y en México la distribución asciende al 60% de la superficie territorial (Montaño et al., 2016).

A escala de cuenca, la cuantificación, la planeación y el manejo de los recursos hídricos se realizan a partir de los balances hídricos (BH). El objetivo es mejorar la administración, la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos para lograr el bienestar social y económico sin poner en riesgo la sustentabilidad de los ecosistemas (Barrantes-Moreno, 2012; Sadí-Laporte, 2014). Los cálculos de los BH se basan en el principio de conservación de la masa (cambio en el almacenamiento = entradas - salidas).

De manera general, la precipitación y la evapotranspiración son los flujos hidrológicos que componen las entradas y salidas principales de agua a largo plazo en una cuenca hidrológica (D'Odorico et al., 2018). La precipitación se mide de manera directa con estaciones climatológicas si están equipadas con pluviómetros. Por otro lado, la evapotranspiración engloba las pérdidas por evaporación directa del suelo, cuerpos de agua y la transpiración de la vegetación (Allen et al., 1998).

La evapotranspiración se estima mediante un colectivo de parámetros climáticos, geográficos y horas de sol (evapotranspiración potencial, ETP) (Segura-Castruita & Ortiz-Solorio, 2017), utilizando cultivos bien irrigados de referencia (evapotranspiración de referencia, ET<sub>o</sub>)

(Allen et al., 1998) y bajo condiciones particulares existentes en cada región/temporada (clima y vegetación) (evapotranspiración actual o real,  $ET_a$ ) (Allen et al., 1998). La  $ET_a$  es un flujo hidrológico sumamente difícil de cuantificar ya que está controlada por la demanda atmosférica (radiación solar, velocidad del viento, temperatura y déficit de presión de vapor), el tipo de vegetación y la humedad disponible del suelo (Ajami, 2021). Sin embargo, la aplicación del método Eddy Covarianza permite su aproximación, aunque este método está limitado por sus elevados requisitos de hardware, costo y mantenimiento del equipo (Er-Raki et al., 2013).

La cuantificación de la ET<sub>a</sub> en los BH es de suma importancia, así como minimizar los costos operativos para su estimación. En este sentido, en este trabajo de investigación se propuso realizar la aproximación de ET<sub>a</sub> en una zona experimental de la subcuenca El Mogor, en el Valle de Guadalupe, localizada en el estado de Baja California, México. Para cumplir con el objetivo, se integró la metodología propuesta en el manual de la FAO–56 (Allen et al., 1998) con datos de humedad del suelo, datos climáticos y datos de sensores remotos satelitales durante el periodo de estudio (junio 2015 – septiembre 2016). Los principales resultados fueron 1) el modelo matemático predictivo para calcular el coeficiente de vegetación a partir de imágenes satelitales, 2) la aplicación de dicho modelo para calcular la evapotranspiración real y 3) evaluación de la evapotranspiración actual calculada con la medida por una estación de flujo turbulento (método Eddy Covarianza).

#### **1.1. Antecedentes**

El Valle de Guadalupe (VG) se caracteriza por ser una región vitivinícola y turística. Es parte de la Ruta del Vino y es el área vinícola más importante del país ya que produce cerca del 90% de los vinos de todo México (Adame, 2018). El acuífero del Valle de Guadalupe constituye la única fuente de abastecimiento para las industrias vinícolas y para la región (Daesslé et al., 2006)

y desde 2008 está en estado de sobreexplotación (Comisión Nacional del Agua; CONAGUA, 2020). Por lo tanto, conocer la disponibilidad de agua y los procesos hidrológicos que influyen en el almacenamiento de agua del acuífero a través de posibles mejoras en los BH es prioritario.

En la región se han realizado trabajos de investigación en los que se han estudiado los procesos hidrológicos naturales, actualizaciones de la disponibilidad de agua y el impacto hacia el valle y el Acuífero Guadalupe. Por ejemplo, Kurczyn-Robledo et al. (2007) evaluaron el volumen de escurrimiento superficial aportado al Valle de Guadalupe a partir de la información sobre la textura del suelo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el método de las curvas numéricas, cartas geológicas y análisis de la precipitación para el periodo de 1967 al 2003; el resultado estimó un escurrimiento medio anual entre  $258,000 \pm 123,000 \text{ m}^3$ .

Del Toro-Guerrero & Kretzschmar (2016) realizaron una clasificación histórica sobre la severidad, la duración y la frecuencia de la sequía meteorológica basándose en la relación de la precipitación y la evapotranspiración potencial en el Valle de Guadalupe y el cálculo del Índice de Reconocimiento de la Sequía. Más tarde en 2020, los mismos autores complementaron sus resultados con la variación histórica de la precipitación, la temperatura y eventos extremos (Del Toro-Guerrero & Kretzschmar, 2020). Los resultados demostraron una reducción en la tasa de precipitación anual en los últimos 20 años. En el mismo año, la Comisión Nacional del Agua llevó a cabo la actualización regular del registro de disponibilidad de agua en el acuífero Guadalupe y se indicó un déficit de 18.4 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, puntualizando que no existen posibilidades de otorgar nuevas concesiones (CONAGUA, 2020).

Del Toro-Guerrero et al. (2014), realizaron una cuantificación hidrogeológica integral en la subcuenca El Mogor con métodos empíricos (balance hídrico directo) e información directa (sitios de aforo y medidores de presión). Calcularon el aporte hídrico de la subcuenca hacia el Acuífero Guadalupe en los años hidrológicos 2010 y 2011. Los resultados principales fueron la estimación de la recarga 466,000 m<sup>3</sup> y un escurrimiento superficial de 60,000 m<sup>3</sup> hacia el Acuífero Guadalupe.

Posteriormente, Villarreal-Rodríguez (2012), analizó la variabilidad interanual de la evapotranspiración actual en la subcuenca El Mogor ubicada en el Valle de Guadalupe y lo comparó con otro ecosistema semiárido localizado en El Rayón, Sonora durante tres años hidrológicos (2008, 2009 y 2010). Ambos ecosistemas presentan distintos factores climáticos que inciden sobre las tasas de evapotranspiración actual (ej., radiación solar y precipitación). Los resultados locales revelaron que en el 2008 la subcuenca El Mogor presentó una tasa de evapotranspiración de 164 mm año<sup>-1</sup> que representó el 41% de la precipitación anual, mientras que para el 2009 y 2010 las tasas de evapotranspiración actual fueron de 170 mm año<sup>-1</sup> y 212 mm año<sup>-1</sup>, respectivamente.

Años más tarde Flores-Zavala (2016), calculó la conductancia estomática y la transpiración de las ocho especies de plantas más abundantes en la subcuenca El Mogor, así como la evaporación del agua del suelo para cuatro temporadas del año 2014 (lluvias, secas y sus transiciones). Los flujos de transpiración y evaporación se calcularon derivados de tres patrones espaciales y estacionales (cobertura vegetal, condiciones geomorfológicas y temporada hidrológica). Se encontró que los meses de julio y agosto (temporada seca) presentaron la tasa de evaporación más alta (50 - 70%) de la temporada hidrológica y que la lavanda del desierto (*Hyptis emoryi*) presentó los valores de transpiración más altos en comparación del alforfón silvestre (*Eriogonum fasciculatum*) que es la especie más abundante del sitio de estudio.

Del Toro-Guerrero et al. (2018), examinaron las variaciones temporales del contenido de agua en el suelo, los patrones de infiltración y la recarga potencial en tres sitios de un bloque de montaña de la subcuenca El Mogor (laderas orientación norte, sur y un valle intermontano) durante el periodo de mayo 2014 a septiembre 2016. Los resultados revelaron el aumento en el contenido de agua en el suelo en las laderas opuestas durante la temporada húmeda (diciembre – marzo), seca (junio – septiembre) y las transiciones entre temporadas (húmeda a seca [abril – mayo] y seca a húmeda [octubre – noviembre]) seguido del agotamiento rápido después de los eventos de precipitación, por lo contrario, al valle intermontano presentó un agotamiento del contenido de agua en el suelo lento. La recarga ocurre solo en la temporada húmeda con eventos de precipitación mayores a 50 mm mes<sup>-1</sup> en las laderas con orientación sur y 120 mm mes<sup>-1</sup> en las laderas con orientación norte, indicando que solo alrededor del 9.5% de la precipitación contribuye a la recarga del acuífero.

Posteriormente, Del Toro-Guerrero et al. (2019), determinaron la importancia de la precipitación y la topografía para representar el verdor de la vegetación mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Se consideraron aspectos como la orientación de las laderas, índices topográficos e información de la precipitación de tres décadas (1986 – 2016) con el objetivo de conocer el vínculo del hidroclima, los parámetros del terreno y el verdor de la vegetación.

Rodríguez-Bastarrachea (2019), calculó la cantidad de hojas presentes en las ramas terminales de seis individuos de las nueve especies predominantes de la vegetación en el rancho el Mogor. Obtuvo la firma espectral foliar de las mismas especies mediante tres índices de vegetación: NDVI, Índice de Reflexión Fotoquímica (PRI) e Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). Midió la elongación de las ramas principales de las especies estudiadas durante el período de septiembre 2017 – mayo 2018. Encontró asociaciones entre los índices de vegetación y la fenología de la vegetación, permitiendo conocer de manera práctica y rentable los cambios en la cantidad de biomasa verde en las especies predominantes en el chaparral y la vid.

En 2019, Vegliante-Arrieta determinó la dinámica de la cobertura vegetal aplicando el Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) derivados de sensores remotos, con lo que obtuvo mapas de cobertura vegetal, uso del suelo y el tipo de suelo en el periodo del 2009 – 2018 utilizados para el manejo del recurso hídrico en la subcuenca El Mogor.

#### 1.2. Glosario

Agotamiento de la humedad en la zona radicular (D). Representa la cantidad de agua faltante con respecto al contenido de agua en el suelo en capacidad de campo (Allen et al., 1998).

Lámina de evaporación acumulada (D<sub>e</sub>). Representa el agua evaporada diaria que se encuentra en la superficie del suelo (Amazirh et al., 2021).

**Relación de agotamiento de humedad (D**<sub>r</sub>**).** Se define como la relación que hay entre el agotamiento de agua en el suelo y el agua total disponible (Allen et al., 1998; Bastos-Lyra et al., 2016).

**Método Eddy Covarianza.** Es una técnica micro meteorológica para realizar mediciones de gases, transferencia de energía, tasas de emisión a alta velocidad de CO<sub>2</sub> y vapor de agua en el aire (Burba, 2013).

**Estación climatológica (ECL).** Es un instrumento que se instala en la intemperie en un punto estratégico para obtener información climática de una región particular. Algunos de los parámetros climáticos que miden las estaciones son: la precipitación, temperatura, evaporación, radiación solar y velocidad del viento (CONAGUA, 2013).

**Evapotranspiración (ET).** Se refiere a la suma de la evaporación y transpiración, la primera ocurre en cuerpos de agua o superficies y la transpiración es la pérdida de agua por un proceso fisiológico de la vegetación (Trezza, 2008).

**Evapotranspiración actual (ET**<sub>a</sub>). Es la cantidad de agua que es efectivamente evaporada de la superficie del suelo y el agua transpirada por la vegetación. Indirectamente, se estima como el producto de dos factores: la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) que representa el potencial de evaporación por las demandas atmosféricas y un coeficiente de vegetación natural ( $K_c$ ) que incorpora información sobre la humedad, evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación (Allen et al., 1998; Jensen y Allen, 2016).

**Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>).** Se refiere a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia hipotética la cual no tiene restricciones de agua, generalmente se basa en una superficie de césped bien irrigado (Santiago-Rodríguez et al., 2012).

**Coeficiente de vegetación (K**<sub>c</sub>**).** Es la combinación e incorporación de las características de la vegetación natural y de la humedad en el suelo, que permite entender el comportamiento de la transpiración de la vegetación y la evaporación del suelo (Allen et al., 1998).

Valor máximo del coeficiente de vegetación ( $K_{c max}$ ). Es el valor máximo de  $K_{c}$  y representa la evapotranspiración máxima de cualquier área de cultivo o vegetación natural (Allen et al., 1998).

**Coeficiente de transpiración de la vegetación (K**<sub>cb</sub>**).** Representa el componente de la transpiración de la vegetación el cual tendrá valores menores a K<sub>c</sub> ya que lo afecta la evaporación del suelo (Allen et al., 1998).

**Coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la vegetación** (K<sub>cb full</sub>). representa el valor de K<sub>cb</sub> cuando la vegetación se encuentra en su máximo desarrollo (altura y dosel máximo de la planta) (Allen et al., 1998).

**Coeficiente de evaporación en el suelo (K**<sub>e</sub>**).** Representa el componente de la evaporación directa en el suelo (Allen et al., 1998).

Coeficiente de reducción de la evaporación en el suelo (K<sub>r</sub>). Es una variable adimensional que depende del agotamiento de agua en la zona radicular y tiene un rango de 0 - 1Cuando el suelo está húmedo K<sub>r</sub> = 1 (cerca o hasta  $\theta_{fc}$ ), cuando comienza la evaporación efectiva (una vez que termina el evento de humedecimiento del suelo) K<sub>r</sub> disminuye por debajo de 1 y llega a cero cuando el suelo está seco (Allen et al., 1998; Jensen y Allen, 2016).

**Coeficiente de estrés hídrico (K**<sub>s</sub>). Es un indicador del estado al qué llega el suelo cuando el agua es insuficiente para satisfacer la demanda hídrica de la vegetación. Depende fundamentalmente del contenido de humedad en la zona radicular y de la textura del suelo (Kokkotos et al., 2020).

Índice de Área Foliar (LAI). Representa el área fotosintética que tiene una planta con relación a la superficie del suelo por debajo de ella. Se expresa como m<sup>2</sup> de área foliar por m<sup>-2</sup> de suelo (Breda, 2003; Rodríguez, 2006).

Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE). Es el índice que mide la cantidad de clorofila en las plantas en la vegetación de crecimiento tardío, es decir, cuando la vegetación ha acumulado altas concentraciones de clorofila debido a que la luz roja no penetra de forma adecuada las capas de la vegetación (Boiarskii, 2019; EOS, 2019).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Refleja la respuesta espectral de la vegetación vigorosa indicando el verdor de la vegetación (Tucker, 1979).

Agua fácilmente evaporable (REW). Indica la máxima cantidad de agua que puede ser evaporada inmediatamente después de un evento de humedecimiento en el suelo y se limita a la cantidad de energía atmosférica disponible (Allen et al., 1998; Irigoyen et al., 2006).

**Humedad relativa (RH).** Se refiere al porcentaje de vapor de agua que hay en el aire a una temperatura, presión y tiempo determinado en comparación con el contenido máximo de humedad que puede contener el aire (Callahan et al., 2019; Yahia, 2019).

**Sonda de perfil (SP).** Consiste de una varilla de policarbonato sellada de 25 mm de diámetro con sensores electrónicos (que son vistos como pares de anillos de acero inoxidable) que generan un campo electromagnético para estimar el contenido de humedad en el suelo a diferentes profundidades (Delta-T Devices Ltd, 2016).

Sensores remotos (SR). Son instrumentos que realizan la detección y seguimiento de características físicas del terreno midiendo la radiación reflejada y emitida (normalmente desde un satélite o avión). Estos sensores son utilizados para obtener y recolectar información en imágenes de forma rápida de un objeto, área o fenómeno natural y cuya información puede ser procesada por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Veneros et al., 2020; USGS, 2022).

Agua total disponible (TAW). Es la diferencia que existe entre el contenido de agua a capacidad de campo y el contenido de agua en el punto de marchitez permanente (Bastos-Lyra et al., 2016) e indica la cantidad de agua disponible para el consumo de la vegetación (Kokkotos et al., 2020).

**Agua total evaporable (TEW).** Se refiere a la lámina máxima de humedad que se puede evaporar en el suelo cuando la superficie fue humedecida completamente (Allen et al., 1998).

Índice de Vegetación (VI). Los índices de vegetación son una combinación de 2 o más bandas espectrales que están diseñados para maximizar las características de la cobertura vegetal y al mismo tiempo minimizar factores de la reflectancia del suelo y de la atmósfera (Fang & Liang, 2014).

**Contenido de agua en el suelo (\theta).** Es una medida volumétrica o de la masa de la cantidad de agua almacenada en el suelo (Brouwer et al., 1985).

**Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (\theta\_{fc}).** Es la cantidad de agua que está retenida en el suelo por capilaridad después de la saturación. Generalmente ocurre de 2 a 3 días después de un evento de lluvia o riego. Para su cálculo es necesario considerar factores como la textura del suelo, capas de suelo altamente permeables y la profundidad del suelo (Rai et al., 2017; Robertson et al., 2021).

**Contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente (\theta\_{wp}).** Se refiere a la cantidad de agua que se mantiene en el suelo pero que ya no puede ser utilizada por las plantas (Kirkham, 2014).

#### 1.3. Justificación

Es de suma importancia conocer la cantidad de agua disponible en un área limitada hidrológicamente. De acuerdo con López-Lambraño et al. (2017), la evapotranspiración representa la mayor pérdida de agua en un sistema hidrológico (hasta 56% de la lluvia anual registrada). Por su facilidad de cálculo, la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) se ha realizado a través de métodos empíricos (ej., Thornthwaite, Hargreaves, Turc) sin embargo, suele ser poco precisa (Sánchez-Martínez & Carvacho-Bart, 2011) ya que se basa sólo en la información de la temperatura ambiental, horas sol y la latitud (Trezza, 2008; González-Cervantes et al., 2012). No se consideran otros aspectos climáticos (ej., radiación solar, velocidad del viento, ET<sub>o</sub>), del paisaje (ej., elevación, pendiente, orientación de la pendiente, vegetación) y de humedad del suelo.

En este trabajo de investigación se integró la metodología propuesta por la FAO-56 con datos de la evapotranspiración de referencia  $(ET_o)$ , humedad del suelo y sensores remotos para estimar la evapotranspiración actual calculada  $(ET_{a cal})$  de la vegetación natural (chaparral) en una región con clima tipo semiárido Mediterráneo.

Los resultados estimados por fecha satelital disponible de la  $ET_{a cal}$  se compararon con la evapotranspiración actual medida ( $ET_{a med}$ ) por una estación de flujo turbulento Eddy Covarianza cercana al sitio de estudio (2.8 km). Finalmente, se obtuvieron modelos de regresión lineal para relacionar la  $ET_{a cal}$  con la  $ET_{a med}$  con el propósito de mejorar los balances hídricos locales. Trabajos previos en la región han estudiado a la ET en cultivos establecidos y en la vegetación natural, sin embargo, el aporte de este trabajo de investigación al conocimiento regional se enfoca en: a) el cálculo del K<sub>c</sub> de la vegetación natural; b) la obtención de un modelo predictivo de K<sub>c</sub>; c) la estimación de  $ET_a$  verificada con datos medidos por una estación Eddy Covarianza.

#### 1.4. Hipótesis

La interrelación de los factores climáticos, de humedad del suelo y la señal espectral de la vegetación medida con sensores remotos permitirá la estimación de la evapotranspiración actual en el sitio de estudio.

#### 1.5. Preguntas de investigación

Las preguntas que motivan este trabajo son:

- ¿Se podrá mejorar la estimación de la ET<sub>a</sub> por medio de la metodología propuesta en este trabajo?
- ¿Es viable estimar la ET<sub>a</sub> con datos de índices de vegetación derivados de datos de teledetección, información del contenido de agua en el suelo e información climatológica?

### 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo general

Desarrollar y validar un modelo predictivo del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) con información de índices de vegetación derivados de sensores remotos para una zona semiárida mediterránea: Estudio de caso la subcuenca El Mogor.

## 1.6.2. Objetivos particulares

- Estimar el coeficiente de estrés hídrico y del suelo desnudo, mediante la implementación de la metodología de la FAO-56.
- Calcular el coeficiente de transpiración de la vegetación mediante el índice de área foliar con información de imágenes satelitales.
- Comparar la ET<sub>a cal</sub> mediante la metodología de la FAO–56 integrando datos de sensores remotos con la ET<sub>a med</sub> en la estación de flujo turbulento Eddy Covarianza ubicada en la subcuenca El Mogor.

## Capítulo 2. Metodología

#### 2.1. Sitio de estudio

La Subcuenca El Mogor (SEM) se ubica a 26 km al noreste de la ciudad de Ensenada, Baja California, México (Vegliante-Arrieta, 2019) (Figura 1a). Tiene una extensión territorial aproximada de 19 km<sup>2</sup>, delimitada entre los paralelos 32° 01′ 15″ y 32° 04′ 15″ de latitud norte y entre los meridianos 116° 30′ 33″ y 116° 37′ 17″ de longitud oeste (Figura 1b). Presenta elevaciones que van de los ~300 a los ~1300 msnm con pendientes fuertes en el 85% del terreno y pendientes suaves en el 15% restante (Del Toro-Guerrero et al., 2014). El 33% de la orientación de la pendiente está orientada hacia el Sur, el 29% hacia el Norte, el 22% hacia el Oeste y el 16% restante tiene una orientación hacia el Este (Vegliante-Arrieta, 2019).

El clima es semiárido mediterráneo, con veranos secos e inviernos frescos y lluviosos; tiene una temperatura media anual que ronda los 16.8 °C (Del Toro-Guerrero et al., 2014; CONAGUA, 2018) y una precipitación media de 290 mm año<sup>-1</sup> (Cabello-Pasini et al., 2017). La vegetación predominante en la subcuenca es el chaparral con especies como: *Ornithostaphylos Oppositifolia* (Palo Blanco), *Cneoridium Dumosum* (Hierba del Zorrillo), *Salvia Apiana* (Salvia Blanca), *Hazardia Squarrosa* (Diente de Sierra), *Fraximus parri* (Fresno de chaparral), *Condea Emoryi* (Lavanda del Desierto), *Malosma Laurina* (Lentisco), *Adenostoma Fasciculatum* (Chamizo) y *Baccharis Salicifolia* (Azumiate) (Del Toro-Guerrero et al., 2018; Vegliante-Arrieta, 2019).

El Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC) se localiza en una pequeña porción (400 m<sup>2</sup>) de un valle intermontano en la SEM a unos 435 msnm cuya área fue delimitada por (Del Toro-Guerrero et al., 2019); hay equipos especializados instalados para medir el contenido de agua en el suelo y variables climáticas (Figura 1b). A aproximadamente 2.8 km hacia el oeste se localiza la estación Eddy Covarianza (EEC) en las faldas de una colina a unos 405 msnm cuya información

climática se utilizó para validar las observaciones realizadas en el LHC (Figura 1b). La estación Eddy Covarianza ha operado continuamente desde 2008 en el Rancho El Mogor y el responsable es el Dr. Stephen Bullock del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).



**Figura 1.** (a) Macrolocalización de la subcuenca El Mogor (SEM); (b) localización del sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) y del Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC).

#### 2.2. Marco Teórico

El flujo de trabajo y el diseño del experimento se resumen en la Figura 2. Se utilizaron datos del contenido de agua en el suelo, datos climáticos e información de teledetección derivada

de imágenes de satélite. La información se integró en la metodología de la FAO–56 (Allen et al., 1998) para estimar un coeficiente de la vegetación natural (K<sub>c</sub>) en el LHC a partir de tres coeficientes: un coeficiente de estrés hídrico del suelo (K<sub>s</sub>), un coeficiente de transpiración de la vegetación (K<sub>cb</sub>) y un coeficiente de evaporación de agua del suelo (K<sub>c</sub>). La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se obtuvo de la estación climática Davis Vantage PRO2 Plus localizada en el LHC. Con el producto de ambas variables (K<sub>c</sub> \* ET<sub>o</sub>) se estimó la evapotranspiración actual calculada (ET<sub>a cal</sub>) para la vegetación natural representado una porción de la subcuenca El Mogor. Los resultados se validaron con la evapotranspiración actual medida (ET<sub>a med</sub>) por la EEC.



**Figura 2.** Flujo de trabajo. Los recuadros de color rojo muestran las principales fuentes de datos utilizadas. Los recuadros azules indican los coeficientes calculados para la estimación de K<sub>c</sub>. Los recuadros amarillos muestran las variables requeridas para estimar  $ET_{a cal}$ . Los recuadros verdes representan a la  $ET_{a med}$  y la validación de  $ET_{a cal}$ .

#### 2.3. Metodología de la FAO-56

#### 2.3.1. Coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>)

La estimación del coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) se llevó a cabo aplicando la metodología propuesta por Bastos-Lyra et al. (2016), donde menciona una ecuación logarítmica que considera variables como: el contenido de agua en el suelo ( $\theta$ ), el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ) y el contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente ( $\theta_{wp}$ ). De acuerdo con Bastos-Lyra et al. (2016) se calculó el agua total disponible (TAW) a partir de  $\theta_{fc}$  y  $\theta_{wp}$  (Sección 2.4.2.). A continuación, se muestra la expresión utilizada:

$$TAW = \theta_{fc} - \theta_{wp} \tag{1}$$

Donde:

TAW = agua total disponible  $[m^3 m^{-3}]$ .

 $\theta_{fc}$  = contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

 $\theta_{wp}$  = contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

El siguiente paso fue calcular el agotamiento del agua en la zona radicular (D), la cual depende de  $\theta_{fc}$  y  $\theta$ , se expresa de la siguiente forma:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\theta}_{\rm fc} - \boldsymbol{\theta} \tag{2}$$

Donde:

D = agotamiento del agua en la zona radicular  $[m^3 m^{-3}]$ .

 $\theta_{fc}$  = contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

 $\theta$  = contenido de agua en el suelo [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

Calculado el agotamiento de agua en la zona radicular (D) para todo el periodo de estudio (junio 2015 – septiembre 2016) se continuó con el cálculo de la relación de agotamiento del agua en la zona radicular (D<sub>r</sub>).

$$D_{\rm r} = \frac{D}{TAW}$$
(3)

Donde:

D<sub>r</sub> = relación de agotamiento del agua en la zona radicular [-].

D = agotamiento del agua en la zona radicular  $[m^3 m^{-3}]$ .

TAW = agua total disponible  $[m^3 m^{-3}]$ .

Finalmente, el cálculo de K<sub>s</sub> donde la variable requerida es D<sub>r</sub>.

$$K_{s} = \frac{\ln[(1 - D_{r}) \ 100 + 1]}{\ln(101)}$$
(4)

Donde:

 $K_s$  = coeficiente de estrés hídrico [-].

 $D_r$  = relación de agotamiento del agua en la zona radicular [-].

# 2.3.2. Coeficiente de transpiración en el máximo desarrollo de la vegetación ( $K_{cb full}$ ) y el valor máximo del coeficiente de vegetación ( $K_{c max}$ )

El cálculo de  $K_{cb full}$  y  $K_{c max}$  se realizó a partir de información climatológica y de la altura de la vegetación (Sección 2.5.). Se basó en las ecuaciones propuestas en el manual de la FAO–56 (Allen et al., 1998).  $K_{cb full}$  se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$K_{cb \ full} = K_{cb, h} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$
(5)

Donde:

Kcb full = coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la vegetación

[-].

 $K_{cb, h}$  = corresponde a la Ecuación 6 [m].

 $u_2 =$  velocidad promedio del viento a dos metros de altura [m s<sup>-1</sup>].

RH<sub>min</sub> = humedad relativa mínima diaria [%].

h = altura máxima promedio de la vegetación [m].

La estimación de K<sub>cb, h</sub> se realiza de la siguiente manera:

$$K_{cb, h} = 1.0 + 0.1 h$$
 para  $h \le 2 m$  (6)

El cálculo de  $K_{c max}$  requirió las mismas variables que  $K_{cb full}$ , con la diferencia que a la Ecuación 7 se cambia  $K_{cb, h}$  por la constante 1.2, la cual representa el incremento de la rugosidad aerodinámica de los cultivos o vegetación circundantes durante las etapas de desarrollo, mediados o finales de la temporada de crecimiento, ya que incrementa la transformación de vapor por turbulencia a partir de fracciones expuestas del suelo (Allen et al., 1998). La constante refleja el impacto del albedo del suelo húmedo y la contribución del calor almacenado en el suelo seco antes del evento de humedecimiento (Allen et al., 1998). Dicho esto,  $K_{c max}$  se expresa de la siguiente manera:

$$K_{c \max} = 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$
(7)

Donde:

 $K_{c max}$  = valor máximo del coeficiente de transpiración [-].  $u_2$  = velocidad promedio del viento a dos metros de altura [m s<sup>-1</sup>].  $RH_{min}$  = humedad relativa mínima diaria [%].

h = altura máxima promedio de la vegetación [m].

### 2.3.3. Coeficiente de transpiración de la vegetación (K<sub>cb</sub>)

Allen et al. (1998) proponen una ecuación que se ajusta a la vegetación natural que se ha desarrollado en condiciones de estrés hídrico y que se utiliza en climas áridos y semiáridos. Se consideran aspectos de la vegetación como el valor estimado del coeficiente de transpiración durante la época de máximo desarrollo de la vegetación ( $K_{cb}$  full), el valor mínimo del coeficiente de vegetación ( $K_{c min}$ ) y el índice de área foliar (LAI) calculado a partir de los índices de vegetación (Sección 2.6.1.).

$$K_{cb} = K_{c \min} + (K_{cb \text{ full}} - K_{c \min}) \left(1 - e^{(-0.7 \text{LAI})}\right)$$
(8)

Donde:

K<sub>cb</sub> = coeficiente de transpiración de la vegetación [-].

 $K_{c \min}$  = valor mínimo del coeficiente de vegetación ( $K_{c \min} \approx 0.20$ ) [-].

 $K_{cb full}$  = coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la vegetación [-].

LAI =indice de área foliar  $[m^2 m^{-2}]$ .

De acuerdo con Allen et al. (1998), la vegetación presenta cuatro etapas de crecimiento: la inicial, la de desarrollo, la de mediados y la final o tardía (Figura 3). Generalmente en la etapa inicial y la de desarrollo ocurren los primeros eventos de humedecimiento del suelo, donde la vegetación puede aprovechar gran parte del agua disponible para pasar a una etapa de desarrollo posterior.

La etapa de mediados está regulada principalmente por el tipo de clima de cada zona en particular y tiende a ser la más duradera y es donde la vegetación llega a su máximo verdor y crecimiento. A comparación, la etapa inicial no está regulada por la cantidad de agua disponible, sino por el porcentaje de suelo desnudo, la evaporación se encuentra reducida en la superficie del suelo (Allen et al., 1998).

Finalmente, la etapa tardía se caracteriza por ser la más corta, por lo regular presenta poca disponibilidad de agua para la vegetación, entrando en un estado de marchitamiento o senescencia. La descripción de estas etapas cabe mencionar que de acuerdo con Allen et al. (1998), fueron hechas para vegetación o cultivos bien irrigados, se pueden observar ligeros cambios en la duración de cada una de ellas en los análisis de la vegetación hechas para los sitios de estudio.

Los periodos de las etapas de crecimiento de la vegetación están relacionados al verdor y estructura del dosel, por lo que se utilizaron para analizar las asociaciones y diferencias entre los VIs, LAIs, coeficientes (Ks, Kcb, Ke) y Kc, los cuales están relacionados.

Para realizar un análisis homogéneo entre los diferentes coeficientes y variables calculadas se visualizarán gráficamente las etapas de crecimiento de la vegetación en las diferentes figuras que se muestran en las secciones 3.3. Análisis de la vegetación, 3.3.1. Evaluación del Índice de Área Foliar y 3.4. Estimación del coeficiente de vegetación.



**Figura 3.** Coeficiente de transpiración en las etapas de crecimiento de la vegetación. Esquema tomado de Allen et al. (1998).

### 2.3.4. Coeficiente de reducción de la evaporación del suelo (Kr)

La evaporación se lleva a cabo en la parte superficial del suelo (0.2 metros de profundidad) en dos etapas, la primera cuando la superficie del suelo está completamente húmeda ( $K_r = 1$ ); la segunda, cuando el agua en la superficie del suelo comienza a evaporarse. Aquí, el valor de  $K_r$ disminuye hasta llegar a cero cuando el agua se agota totalmente (Allen et al., 1998; Amazirh et al., 2021). A continuación, se muestra la ecuación que explica el coeficiente de reducción de la evaporación.

$$K_{\rm r} = \frac{\rm TEW - D_e}{\rm TEW - REW}$$
(9)

Donde:

K<sub>r</sub> = coeficiente de reducción de la evaporación del suelo [-].

TEW = agua total evaporable [mm].

 $D_e = lámina$  acumulada de evaporación [mm].

REW = agua fácilmente evaporable [mm].

Allen et al. (1998) indicaron que el agua evaporada de la superficie del suelo (0.2 metros de profundidad) corresponderá a la variación entre  $\theta_{fc}$ . y un punto intermedio entre el  $\theta_{wp}$  y el secado al horno (sin agua remanente). Por lo que TEW es la evaporación máxima de la capa superficial (hasta 0.2 metros de profundidad) y se calcula de la siguiente manera.

$$TEW = 1000 \left(\theta_{fc} - 0.5 \theta_{wp}\right) Z_e$$
(10)

Donde:

TEW = agua total evaporable [mm].

1000 = factor de conversión de metros a milímetros.

 $\theta_{fc}$  = contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

 $\theta_{wp}$  = contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

Ze = profundidad del suelo que está sujeta al secado por evaporación (0.20) [m].

El cálculo de REW se llevó a cabo mediante la metodología mencionada en Jensen y Allen (2016). Su cálculo se basa en el porcentaje relativo de arenas o arcillas presentes en el suelo, ya que un suelo con textura gruesa (arenas) está asociado a una mayor conductividad hidráulica y una menor retención de agua por las partículas de suelo que lo componen (Irigoyen et al., 2006). De acuerdo con los resultados calculados del análisis del suelo (Sección 3.2.) y los porcentajes de arena y arcillas se utilizó la Ecuación 11.

$$REW = 20 - 0.15(Sa) \qquad \text{para } Sa > 80\% \tag{11}$$

$$REW = 11 - 0.06(Cl) \qquad para Cl > 50\%$$
(12)

REW = 
$$8 + 0.08$$
(Cl) para Sa <  $80\%$  y Cl <  $50\%$  (13)

Donde:

REW = agua fácilmente evaporable [mm].

Sa = porcentaje de fracción de arenas [%].
Cl = porcentaje de fracción de arcillas [%].

Al calcular la lámina acumulada de evaporación (D<sub>e</sub>) se requirió de un balance hídrico diario de la capa superficial del suelo (0 – 0.20 m), el cual se basa en la información de  $\theta$  y  $\theta_{fc}$  (Amazirh et al., 2021). A continuación, se expresa la ecuación utilizada para su cálculo.

$$D_e = 1000(\theta_{fc} - \theta) Z_e$$
(14)

Donde:

D<sub>e</sub> = lámina acumulada de evaporación [mm].

1000 = factor de conversión de metros a milímetros.

 $\theta_{fc}$  = contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

 $\theta$  = contenido de agua en el suelo [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

Z<sub>e</sub> = profundidad del suelo que está sujeta al secado por evaporación (0.20) [m].

## 2.3.5. Coeficiente de la evaporación del agua en el suelo (K<sub>e</sub>)

La evaporación de agua del suelo es máxima después de un evento de precipitación (K<sub>e</sub> tiende a 1), si  $\theta$  se reduce, el valor de K<sub>e</sub> disminuye hasta llegar a cero cuando el suelo está seco (temporada de estiaje) (Allen et al., 1998). El cálculo del coeficiente de evaporación en el suelo se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por Allen et al. (1998) y Amazirh et al. (2021). A continuación, se muestra la ecuación utilizada para su cálculo.

$$K_e = K_r (K_{c \max} - K_{cb})$$
(15)

Donde:

 $K_e$  = coeficiente de la evaporación en el suelo [-].  $K_r$  = coeficiente de reducción de la evaporación del suelo [-].  $K_{c max}$  = valor máximo del coeficiente de vegetación [-].  $K_{cb}$  = coeficiente de transpiración de la vegetación [-]. Habiendo calculado los parámetros  $K_s$ ,  $K_{cb}$  y  $K_e$ , se aplicó la fórmula propuesta en el manual de la FAO–56 (Allen et al., 1998) para estimar el coeficiente de la vegetación natural ( $K_c$ ). A continuación, se muestra la ecuación utilizada para calcular  $K_c$ .

$$K_c = K_s (K_{cb} + K_e) \tag{10}$$

Donde:

 $K_c$  = coeficiente de vegetación [-].

 $K_s$  = coeficiente de estrés hídrico en el suelo [-].

K<sub>cb</sub> = coeficiente de transpiración de la vegetación [-].

 $K_e$  = coeficiente de evaporación en el suelo [-].

## 2.3.7. Evapotranspiración de referencia, Penman – Monteith (ET<sub>o</sub>)

La evapotranspiración de referencia  $(ET_o)$ , se obtuvo de mediciones directas de la estación climática Davis ubicada en el LHC. Sin embargo, es importante considerar el método por el cual la estación realiza el cálculo de esta variable automáticamente. En la Ecuación 17 muestra la ecuación que aplica la estación Davis para su cálculo y las variables que se requieren.

$$ET_{o} = \frac{0.408 \,\Delta(R_{n} - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_{2}(e_{s} - e_{a})}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_{2})}$$
(17)

Donde:

 $ET_o = evaporación de referencia [mm día<sup>-1</sup>].$ 

 $\Delta$  = pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>].

 $R_n$  = radiación neta en la superficie de la vegetación [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>].

G =flujo del calor del suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>].

 $\Upsilon$  = constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>].

T = temperatura media del aire a 2 m de altura [°C].

 $u_2 =$  velocidad del viento a 2 m de altura [m s<sup>-1</sup>].

(16)

 $e_s = presión de vapor de saturación [kPa].$ 

 $e_a = presión real de vapor [kPa].$ 

### 2.3.8. Evapotranspiración actual calculada (ET<sub>a cal</sub>)

De acuerdo con el manual de la FAO–56 (Allen et al., 1998) la  $ET_a$  cal se estima con el producto del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) como se muestra en la siguiente expresión:

$$ET_{a cal} = K_c ET_o$$
(18)

Donde:

 $ET_{a cal} = evapotranspiración actual calculada [mm día<sup>-1</sup>].$ 

K<sub>c</sub> = coeficiente de vegetación [-].

ET<sub>o</sub> = evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>).

## 2.4. Propiedades del suelo

Se establecieron las propiedades del suelo a través de la recolección directa de muestras de suelo en dos campañas de campo de los primeros 0.20 m medidos desde la superficie del terreno. La primera campaña de campo se realizó en el LHC (junio 2021) y la segunda en el sitio de la EEC (julio 2022) (Figura 4a). En gabinete se realizó un mallado de 20 x 20 metros (representando nueve cuadrantes) con el programa QGIS 3.18.2. en el LHC. Se colectaron en total nueve muestras de suelo en el centro de cada cuadrante. La sonda de perfil de humedad del suelo se ubica en el centro del mallado (Figura 4b). En el sitio EEC se tomaron un total de cinco muestras de suelo las cuales se recolectaron aleatoriamente debido a la presencia de sensores instalados cerca de la estación Eddy Covarianza (Figura 4c). En ambas campañas de campo, las muestras recolectadas se transportaron al laboratorio donde se procesaron para determinar el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ), la densidad aparente y la textura del suelo por sitio de muestra.



Posteriormente se calculó el promedio de  $\theta_{fc}$  y del contenido de arena, limo-arcilla por sitio de estudio (LHC y EEC) para obtener un panorama general de las propiedades físicas del suelo.

**Figura 4.** (a) Localización del sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) y del Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC); (b) localización de los puntos de recolecta de muestras de suelo en el sitio LHC; (c) localización de los puntos de recolecta de muestras de suelo en el sitio EEC. SEM representa a la subcuenca El Mogor; SP es la sonda de perfil; ECL representa a la estación climática Davis y PRMS son los puntos de recolecta de muestras de suelo.

### 2.4.1. Sensores de humedad en el suelo

La información del contenido de agua en el suelo en el LHC se obtuvo con una sonda de perfil PR2/6 y un registrador de datos GP2 de la compañía Delta-T Devices. La sonda de perfil mide el contenido volumétrico de agua en el suelo en seis profundidades diferentes y el registrador de datos los almacena para su recopilación. Los sensores están colocados de forma vertical a los 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6 y 1 m de profundidad. La sonda consiste en una varilla de policarbonato sellada de 25 mm de diámetro con sensores electrónicos (que son pares de anillos de acero inoxidable). La sonda se inserta en un tubo de pared delgada que a su vez se encuentra enterrado

en el suelo y cuya función es maximizar la penetración del campo electromagnético en el suelo circundante (Delta-T Devices Ltd, 2016; Del Toro-Guerrero et al., 2018).

El contenido volumétrico de agua medido por la sonda se calibró de acuerdo al tipo de suelo registrado en cada profundidad y fue realizada por Del Toro-Guerrero et al. (2018) El funcionamiento de la sonda y el proceso de calibración detallado se describe en Delta-T Devices Ltd (2016) y Del Toro-Guerrero et al. (2018).

La información del contenido de agua en el suelo en la EEC se midió por medio de sensores de humedad colocados a 0.05, 0.1, 0.2 y 0.4 m de profundidad, la información detallada de la instalación y calibración se describe en la tesis de Villarreal-Rodríguez (2012).

## 2.4.2. Contenido de agua en el suelo $(\theta)$

El registrador de datos GP2 se programó para obtener lecturas del  $\theta$  cada 30 minutos (48 mediciones por día). Teniendo en cuenta que Allen et al. (1998) señalan que el proceso de evaporación del suelo se lleva a cabo desde la superficie del terreno hasta los 0.15 – 0.20 m de profundidad, se calculó el promedio de las primeras dos mediciones de la sonda de perfil (0.10 y 0.20 m de profundidad) y el promedio del  $\theta$  por día durante el periodo de estudio (junio 2015 – septiembre 2016).

La serie temporal de  $\theta$  es continua y no presenta datos faltantes durante el periodo de estudio en el caso del LHC. Los datos del  $\theta$  del sitio EEC presentan datos faltantes para los meses de junio – noviembre 2015 y de junio – julio 2016. Las mediciones se realizaron cada 30 minutos y se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente para calcular el  $\theta$  hasta los 0.20 m de profundidad. Los datos proporcionados del  $\theta$  del sitio EEC tiene un mes de datos faltantes (junio – noviembre 2015 y junio 2016).

En ambos sitios de estudio la información del contenido de agua en el suelo permitió estimar los parámetros del contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente ( $\theta_{wp}$ )

y en capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ). En la Figura 5 se muestran  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{wp}$  y TAW en relación con la textura del suelo. El  $\theta_{fc}$  indica el límite superior en el que la vegetación no puede hacer uso del agua, ya que el suelo se encuentra en saturación. El  $\theta_{wp}$  indica cuando la vegetación no puede extraer agua del suelo, este límite se le conoce como agua higroscópica. Finalmente, el Agua Total Disponible (TAW) para que la vegetación pueda subsistir, es representada por la zona entre el  $\theta_{fc}$  y  $\theta_{wp}$  (Allen et al., 1998). Los diferentes tipos de suelo presentan valores característicos de  $\theta_{fc}$  y  $\theta_{wp}$  de acuerdo a su textura (Yost, 2016).



Condición del agua en el suelo

Figura 5. Relación entre el contenido de agua del suelo y la textura del suelo. Modificado de Allen et al. (1998).

El  $\theta_{wp}$ , se calculó con el análisis del periodo de estiaje que abarca la temporada de verano (junio – septiembre) (Del Toro-Guerrero et al., 2018) con la finalidad de establecer el menor contenido de agua en el suelo en los primeros 0.20 m de profundidad. De Oliveira et al. (2015)

indicaron que este valor de  $\theta$  se asocia a la etapa en la que las raíces de la vegetación no pueden extraer agua del suelo y se relaciona con el  $\theta_{wp}$ .

El  $\theta_{fc}$  se calculó en laboratorio tomando como base la metodología propuesta por Walker (1989) para procesar las muestras de suelo recolectadas en las campañas de campo. Se calculó el peso seco del suelo (Ps), el peso del suelo en saturación (Ph), el volumen de agua vertido y perdido en las muestras de suelo y la pérdida de agua por el potencial gravitacional (Pg) para finalmente calcular el  $\theta_{fc}$ .

En las dos campañas de campo se utilizó un muestreador de núcleo dividido de 2" x 6", con punta de rosca de 5/8" para extraer las 14 muestras de suelo manteniendo su estructura original (Figura 6a). El muestreador funciona como una perforadora de golpe. Se le coloca un martillo deslizante normal que va enroscado en la parte superior (Figura 6b) con el que genera el golpeo para que la punta se entierre en el suelo y de esta forma colectar la muestra hasta los 0.20 m de profundidad (Figura 6c).



**Figura 6.** (a) Muestreador de núcleo dividido armado; (b) muestreador de núcleo dividido con el martillo deslizante enroscado; (c) aplicación del método de muestreo; (d) recipiente plástico y su colocación en el muestreador de núcleo dividido.

Dentro del muestreador se colocaron recipientes de plástico con un volumen y peso constante (268 cm<sup>3</sup> y 40 g, respectivamente) para contener las muestras de suelo (Figura 6d). Al finalizar se colocaron dos tapas de plástico en cada recipiente y se transportaron al Laboratorio de Agua y Suelo (Hidrogeoquímica) del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California. Se realizó el proceso de secado al aire de las muestras, la saturación de las muestras, el cálculo de la pérdida de agua por el potencial gravitacional y se registró su peso al finalizar cada proceso. A continuación, se describe la metodología realizada:

- 1. Se asignó un número de clave a cada muestra de suelo.
- 2. Se pesó cada recipiente de plástico vacío, incluyendo las tapas (43 g).
- 3. Las muestras de suelo se dejaron secar al aire por  $\sim$ 15 días (Figura 7a).
- 4. Posteriormente las muestras se pesaron en una báscula con una exactitud de ± 1 g (Figura 7b).
- 5. Al peso total de cada muestra de suelo se le restaron los 43 g del cilindro y las tapas.
- Se quitó con precaución la tapa inferior del cilindro, se le colocó un papel aluminio y se selló con cinta adhesiva para no dejar salir líquidos por la parte inferior (Figura 7c).
- Se colocó cinta adhesiva en la parte superior como una barrera para retener el agua durante el proceso de infiltración (Figura 7c).
- 8. Se saturaron las muestras de suelo con un dispensador de botella marca VWR y se registró en una bitácora los ml vertidos por muestra (Figura 7d).
- 9. Se pesó la muestra en saturación (Figura 7e).
- Se perforó el papel aluminio de cada muestra con una punta (orificios pequeños con el fin de no perder suelo y solo dejar pasar el agua).
- 11. Se colocaron las muestras en un recipiente de cerámica para comenzar con la cuantificación de la pérdida de agua por potencial gravitacional (No fue necesario medir el agua que se pierde en cada muestra ya que la diferencia de pesos antes y después del proceso indicó la pérdida de agua) (Figura 7f).
- 12. Se cubrió el cilindro con una tapa para evitar la pérdida de agua por evaporación durante72 horas (Figura 7f).
- 13. Posteriormente las muestras se pesaron nuevamente.

- <image>
- 14. Finalmente se obtuvieron tres pesos: el peso de la muestra seca, el peso de la muestra saturada y el peso de la muestra después de la pérdida de agua por el potencial gravitacional.

**Figura 7.** Método de muestreo y técnica de procesado de las muestras de suelo. (a) Secado de las muestras de suelo al aire libre; (b) pesado de las muestras de suelo; (c) preparación de las muestras de suelo; (d) saturación de las muestras de suelo; (e) pesado de la muestra saturada; (f) proceso de infiltración-percolación de las muestras de suelo.

Finalizado el registro de la información en la bitácora se transcribió la información a hojas de cálculo. El  $\theta_{fc}$ , la densidad aparente, la densidad de la partícula y la porosidad se calcularon con las aproximaciones propuestas por Walker (1989).

$$\theta_{fc} = \rho \left( \frac{Vv - Vp}{Ps} \right) \tag{19}$$

Donde:

 $\theta_{fc}$  = contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [-].

 $\rho$  = densidad aparente del suelo [g cm<sup>-3</sup>].

Vv = volumen de agua vertido a la muestra de suelo [cm<sup>3</sup>].

Vp = volumen de agua perdido por el potencial gravitacional [cm<sup>3</sup>].

Ps = peso de la muestra después del secado [g].

La densidad aparente:

$$\rho = e (1 - \emptyset) \tag{20}$$

Donde:

 $\rho$  = densidad aparente del suelo [g cm<sup>-3</sup>].

e = densidad de la partícula [g cm<sup>-3</sup>].

 $\emptyset$  = porosidad [-].

La densidad de partícula se calculó dividiendo el peso de la muestra seca entre el volumen del cilindro, como se muestra a continuación:

$$e = \frac{P_{\rm S}}{V_{\rm t}} \tag{21}$$

Donde:

e = densidad de la partícula [g cm<sup>-3</sup>].

 $P_s = peso de la muestra después del secado [g].$ 

 $V_t$  = volumen total de la muestra de suelo [cm<sup>3</sup>].

El cálculo de la porosidad se realizó dividiendo el volumen de los espacios vacíos en la muestra de suelo sobre el volumen total del cilindro contenedor, el cual es constante para todas las muestras de suelo. A continuación, se muestra la ecuación utilizada:

$$\phi = \frac{V_v - V_p}{V_t}$$
(22)

Donde:

 $\emptyset$  = porosidad [-].

 $V_v$  = volumen de agua vertido a la muestra de suelo [cm<sup>3</sup>].

 $V_p$  = volumen de agua perdido por el potencial gravitacional [cm<sup>3</sup>].

 $V_t$  = volumen total de la muestra de suelo [cm<sup>3</sup>].

(20)

### 2.4.3. Textura del suelo

La textura del suelo indica el contenido relativo de partículas de arena, limo y arcilla presentes en una muestra de suelo y se determinó en el laboratorio a partir de las muestras suelo recolectadas en LHC y EEC. Se siguió la metodología propuesta por la FAO (2006), que incluye el secado, remoción de partículas mayores a dos centímetros, pesado las muestras, y realizar un tamizado. Posteriormente, se calculó el peso del suelo en cada malla, el porcentaje relativo del peso de cada malla con respecto al peso inicial y finalmente se calculó el porcentaje de arena y limo-arcilla para cada muestra de suelo. No se realizó la separación entre limo y arcilla ya que el porcentaje de arena fue mayor al 80% en ocho de las nueve muestras recolectadas.

Cada muestra se extrajo de su recipiente y se colocó sobre una mesa de trabajo cubierta por papel encerado. La muestra se cuarteó (Figura 8a) separando 100 g de suelo. El suelo separado se tamizó con mallas que van de los 2 – 0.063 mm (Figura 8b y Tabla 1). Cada muestra se colocó en la parte superior de la columna de tamices (2 mm) (Figura 8c), se selló y con un agitador de tamices digital para partículas gruesas RX–812 marca TYLER (Figura 8d) se realizó la separación de las partículas de suelo. Las muestras de suelo se agitaron durante 10 minutos (Del Toro-Guerrero, 2012), lo que permitió separar los distintos tamaños de granos en la columna de tamices.



**Figura 8.** (a) Muestra de suelo cuarteada; (b) tamices utilizados; (c) separación del suelo por malla; (d) agitador digital para partículas gruesas con sus respectivos tamices.

Número de tamiz	Tamaño de la abertura de la malla (mm)	Textura	
10	2.000		
14	1.400	Arena muy gruesa	
18	1.000	A rong gragge	
25	0.710	Alena gluesa	
35	0.500	Arona madia	
45	0.355	Alena meula	
60	0.250	Arona fina	
80	0.180	Alena Illia	
120	0.125	Arono muy fino	
170	0.090	Alena muy mia	
230	0.063	Limo y arcilla	

Tabla 1. Número, tamaño de los tamices y la clasificación de la textura del suelo (Wentworth, 1922).

Finalmente se llevó a cabo la clasificación del suelo con base en el triángulo textural del suelo (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA, 2022), el cual indica el tipo de suelo predominante en la zona de estudio.

#### 2.5. Datos climáticos y de la vegetación

La estación climatológica se programó para obtener 48 mediciones diarias (cada 30 min) de todas las variables climáticas ya mencionadas. Se utilizó la información de la humedad relativa mínima (RH<sub>min</sub>) diaria, el promedio de la velocidad del viento a dos metros de altura (u<sub>2</sub>) de la estación climática Davis en LHC y de la EEC. El valor de RH<sub>min</sub> se tomó de las mediciones diarias mínimas registradas por la estación climática para cada día y los valores de u<sub>2</sub> se calcularon con el promedio diario de las mediciones durante el periodo de estudio (junio 2015 – septiembre 2016).

La  $ET_o$  se obtuvo de las mediciones realizadas por la estación Davis ubicada en el LHC la cual utiliza la ecuación de Penman-Monteith Modificada para su estimación automática a partir de la información medida por esta misma información.

### 2.5.1. Altura de la vegetación

Se estimó la altura de la vegetación que circunda el sensor de humedad en el LHC para calcular el coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la vegetación (K<sub>cb</sub> full) y el valor máximo del coeficiente de vegetación (K<sub>c max</sub>). Según el manual de la FAO–56 (Allen et al., 1998), K<sub>cb</sub> full requiere del valor de la altura media mientras que K<sub>c max</sub> requiere este valor cuando la vegetación tiene su máximo desarrollo posible.

La altura de la vegetación en los sitios LHC y EEC se midió directamente en campo con una regla hecha con tubos de PVC, marcada cada 10 cm hasta llegar a los dos metros de altura. Debido a la poca presencia de individuos (arbustos) se midió cada uno de ellos (Figura 9) en un radio de cinco metros alrededor de cada punto de recolección de muestra de suelo y se calculó el promedio de las alturas por sitio. La altura de la vegetación del chaparral no suele variar durante el año y los arbustos típicamente no sobrepasan los dos metros de altura (Castro-Palafox, 2016). Por lo tanto, se infiere que la altura de la vegetación medida durante las salidas de campo son una referencia confiable para calcular K<sub>cb full</sub> y K<sub>c max</sub>.



Figura 9. (a) Medida de la altura de la vegetación natural; (b) acercamiento a la regla de PVC.

#### 2.6. Información de teledetección

La constelación RapidEye es una proveedora de información geoespacial y ha estado en operación del 2009 al 2020 (Coffer et al., 2020). Las imágenes cuentan con correcciones radiométricas, de reflectancia de la superficie de la tierra y geométricas (Planet, 2016).

Se descargó y se procesó la información espectral derivada de imágenes RapidEye obtenidas de la plataforma Planet a través de su programa de educación e investigación (https://www.planet.com/markets/education-and-research/). La descarga de los datos es gratuita usando un correo institucional. En la plataforma se indicó el área de interés y se encontraron un total de 22 imágenes disponibles en el LHC para el periodo de estudio (junio 2015 – septiembre 2016) y un total de 16 imágenes para el sitio de la EEC. En la Tabla 2 se muestran las fechas de los productos obtenidos.

En el Anexo A se muestran las principales características de la misión RapidEye, mientras que cada producto RapidEye está compuesto por los siguientes archivos:

- Archivo de la imagen Archivo en formato GeoTIFF.
- Archivo de metadatos Archivo en formato XML.
- Archivo de inspección rápida Formato GeoTIFF (buscador).

• Sistema de archivo de mapa espacial (SIM) – formato "shape" de ESRI (SHP).

Fechas de imágenes disponibles en el LHC		Fechas de imágenes disponibles en el sitio de la EEC		
3/Jun/2015	19/Mar/2016	11/Nov/2015	16/Jul/2016	
18/Jun/2015	3/Abr/2016	8/Dic/2015	29/Jul/2016	
13/Jul/2015	4/May/2016	6/Feb/2016	6/Ago/2016	
6/Sep/2015	4/Jun/2016	17/Feb/2016	25/Ago/2016	
24/Oct/2015	13/Jun/2016	9/Mar/2016	4/Sep/2016	
17/Nov/2015	2/Jul/2016	19/Mar/2016		
8/Dic/2015	16/Jul/2016	3/Abr/2016		
14/Ene/2016	29/Jul/2016	4/May/2016		
6/Feb/2016	6/Ago/2016	4/Jun/2016		
17/Feb/2016	25/Ago/2016	13/Jun/2016		
9/Mar/2016	4/Sep/2016	2/Jul/2016		

**Tabla 2** Fechas de las imágenes RapidEye disponibles y descargadas en el periodo de estudio (Jun 2015 - Sep 2016) en el Laboratorio de Hidrogeología de Campo (LHC) y en la Estación Eddy Covarianza (EEC).

# 2.6.1. Índices de vegetación

Se calcularon cuatro índices de vegetación: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI) e Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE), con el fin de evaluar qué índice de vegetación es el más apropiado para modelar K<sub>c</sub>.

El NDVI se calcula como la relación que existe entre la reflectancia en la superficie del terreno de la banda roja (630 – 685 nm) y la banda del infrarrojo cercano (760 – 850 nm) (Majumdar et al., 2023). El NDVI toma valores de –1 a 1. En general, valores menores a 0.1 no representan zonas con vegetación verde (Tucker, 1979). A continuación, se muestra la ecuación para calcular NDVI.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$
(23)

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada [-].

NIR = banda del infrarrojo cercano (banda 5 RapidEye) [nm].

Red = banda del rojo (banda 3 RapidEye) [nm].

El SAVI se usa para minimizar la influencia del brillo del suelo en zonas con cobertura vegetal escasa utilizando un factor de corrección (L) y las bandas espectrales del rojo y del infrarrojo cercano. Con frecuencia SAVI se utiliza en zonas áridas y toma valores de -1 a 1, donde los valores negativos corresponden a nubes, agua o nieve, valores de 0 - 0.3 corresponden a zonas con pequeñas cantidades de vegetación verde (Huete, 1988).

El factor L se encarga de atenuar la presencia del suelo desnudo, L toma valores entre 0 (zonas con vegetación verde y densa; SAVI = NDVI) y 1 (zonas con gran cantidad de suelo desnudo) (Huete, 1988). Para zonas áridas y semiáridas el factor L se fija en 0.7 (Qi et al., 1994). A continuación, se muestra la ecuación para obtener SAVI.

$$SAVI = \left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}\right)(1 + L)$$
(24)

Donde:

SAVI = Índice de Vegetación Ajustado al Suelo [-].

NIR = banda del infrarrojo cercano (banda 5 RapidEye) [nm].

Red = banda del rojo (banda 3 RapidEye) [nm].

L = factor de ajuste del suelo (0-1) [-].

El MSAVI minimiza los efectos del suelo desnudo de SAVI, la fórmula surgió de la aplicación de un método de inducción para derivar L. El MSAVI tiene un rango de –1 a 1 donde los valores de –1 a 0.2 corresponden a zonas con suelo desnudo, los valores de 0.2 a 0.4 corresponden a zonas con pequeñas cantidades de vegetación verde y los valores de 0.4 a 1 corresponden a vegetación verde densa (Qi et al., 1994). A continuación, se visualiza la fórmula con la que se calculó MSAVI.

MSAVI = 
$$\frac{\left(2 \text{ NIR} + 1 - \sqrt{(2 \text{ NIR} + 1)^2 - 8 (\text{NIR} - \text{Red})}\right)}{2}$$
(25)

Donde:

MSAVI = Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado [-].

NIR = banda del infrarrojo cercano (banda 5 RapidEye) [nm].

Red = banda del rojo (banda 3 RapidEye) [nm].

El NDRE es un indicador sensible del contenido de clorofila en las hojas, la densidad de las hojas y el suelo y presenta valores más bajos que el NDVI, ya que la banda del rojo no penetra más allá de unas cuantas capas de las hojas. El NDRE es adecuado para etapas de crecimiento medias y tardías de la vegetación ya que la luz del borde rojo penetra con mayor facilidad en el dosel de la vegetación (Boiarskii, 2019). El NDRE tiene un rango de -1 a 1, donde los valores de -1 a 0.2 corresponde a valores con grandes cantidades de suelo desnudo, los valores de 0.2 a 0.6 corresponde a valores con vegetación verde y los valores de 0.6 a 1 corresponden a valores con vegetación verde y muy densa (Bronson et al., 2020).

$$NDRE = \frac{NIR - R Edge}{NIR + R Edge}$$
(26)

Donde:

NDRE = Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo [-].

NIR = banda del infrarrojo cercano (banda 5 RapidEye) [nm].

R Edge = banda del borde rojo (banda 4 RapidEye) [nm].

# 2.6.2. Procesamiento de las imágenes satelitales

El cálculo de los índices de vegetación se realizó en QGIS 3.18.2 mediante la operación de bandas espectrales de las imágenes satelitales en la calculadora raster. Se utilizó el complemento de la Clasificación Semi Automática (Semi Automatic Classification Plugin; SCP) (Congedo, 2014) para separar las bandas espectrales de cada imagen (Azul, Verde, Rojo, Borde del rojo e Infrarrojo cercano). Posteriormente se calculó cada uno de los índices de vegetación previamente mencionados para cada fecha. Finalmente se extrajo el valor espectral por cada índice de vegetación del píxel donde se localizan los puntos de recolecta de muestras de suelo en el LHC y en el sitio de la EEC. Se promediaron los valores resultantes de cada índice con los 9 y 5 píxeles

asignados a LHC y EEC (Anexo B). Los valores por fecha de cada índice de vegetación se colocaron en una base de datos y posteriormente se calculó el Índice de Área Foliar (LAI).

# 2.6.3. Índice de área foliar (LAI)

El Índice de Área Foliar se calculó mediante tres aproximaciones Rodríguez-Moreno & Bullock 2013, Galvincio et al. 2013, y Clemente-Machado 2014, en la literatura los autores no mencionan alguna limitación a la hora de aplicar diferentes VI. La propuesta de Rodríguez-Moreno & Bullock (2013) (LAI<sub>R</sub>) incorpora tres parámetros: el coeficiente de extinción (a<sub>0</sub>), el valor del índice de vegetación (VI) correspondiente al suelo desnudo (a<sub>1</sub>) y el valor del VI cuando LAI tiende a infinito o la saturación (a<sub>2</sub>).

En esta investigación se consideraron los valores de los coeficientes propuestos por Rodríguez-Moreno & Bullock (2013):  $a_0 = 0.72$ ,  $a_1 = 0.61$  y  $a_2 = 0.65$ . A continuación, se muestra la ecuación para calcular el LAI<sub>R</sub>:

$$LAI_{R} = \frac{1}{a_{2}} \ln \left[ \frac{a_{0} - VI}{a_{1}} \right]$$
(27)

Donde:

 $LAI_R =$  índice de Área Foliar propuesto por Rodríguez & Bullock [m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>].

a2 = valor del índice de vegetación cuando LAI tiende a infinito o a la saturación [-]

 $a_0 = coeficiente de extinción [-].$ 

a<sub>1</sub> = valor del VI correspondiente al suelo desnudo [-].

VI = índice de vegetación [-].

La segunda ecuación de LAI fue propuesta por Galvincio et al. (2013) (LAI<sub>G</sub>), la cual fue puesta a prueba en un bosque seco semiárido en el noreste de Brasil. Los resultados generados por Galvincio se compararon con el Algoritmo del Balance de Energía Superficial para la Tierra (Surface Energy Balance Algorithm for Land SEBAL). Galvincio et al. (2013) indicaron que LAI<sub>G</sub> tiene una mayor correlación con respecto a SEBAL, mostrando valores más acordes al tipo de vegetación presente en la zona de estudio.

$$LAI_{G} = e^{1.426 + \frac{-0.542}{VI}}$$
(28)

Donde:

 $LAI_G =$  índice de Área Foliar propuesto por Galvíncio [m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>].

VI = índice de vegetación [-].

La tercera aproximación es la propuesta por Clemente-Machado (2014) (LAI<sub>C-M</sub>) la cual fue desarrollada basándose en imágenes Landsat 5 TM combinadas con mediciones directas de LAI mediante sensores de lente de ojo de pez (método para la medición directa en campo de LAI) en el Parque Nacional de Catimba, Brasil. A continuación, se muestra la expresión para calcular LAI propuesto por Clemente-Machado (LAI<sub>C-M</sub>):

$$LAI_{C-M} = 0.102 e^{5.341 VI}$$
(29)

Donde:

 $LAI_{C-M}$  = índice de Área Foliar propuesto por Machado [m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>].

VI = índice de vegetación [-].

Por lo general en zonas semiáridas LAI puede tomar valores de 0 a 1, mientras que en latitudes medias con bosques y matorrales LAI toma valores de 1 a 6, finalmente para bosques tropicales con vegetación muy densa LAI toma valores de 6 hasta poco más de 9 (Campbell, 2021).

# 2.7. Análisis estadísticos

La regresión lineal se define como un modelo estadístico predictivo que se usa para describir una variable de respuesta o dependiente (y) como una función de una variable predictor o independiente (x) (Kumari & Yadav, 2018). Consiste en generar la ecuación de una recta que explique la relación lineal entre dos variables. La ecuación de la recta se describe a continuación.

$$y = a + bx \tag{30}$$

Donde:

y = variable dependiente [-].

a = ordenada en el origen (valor que toma "y" cuando x = 0 de la línea de regresión) [-].

b = pendiente de la recta (indica cómo cambia "y" al incrementar "x" en una unidad) [-].

x = variable independiente [-].

Se analizó el grado de asociación entre los valores del coeficiente de vegetación (K<sub>e</sub> – variable dependiente) con los valores de los índices de vegetación calculados (VI – variable independiente). Se evaluó el coeficiente de determinación ( $\mathbb{R}^2$ ) y la ecuación de la línea de regresión, la cual funciona como el modelo estadístico predictivo para calcular K<sub>e</sub> a partir de valores de los VI. La validación de la  $\mathrm{ET}_{a \, cal}$  en el LHC a partir del producto de K<sub>e</sub> y  $\mathrm{ET}_{o}$  se realizó con los resultados de los modelos de regresión lineal  $\mathrm{ET}_{a \, cal}$  y  $\mathrm{ET}_{a \, med}$  en la EEC. El coeficiente de determinación del modelo predictivo indica el ajuste entre ambas variables y toma valores entre 0 y 1. Los valores cercanos a 1 indican que los valores de la variable dependiente son explicados en gran proporción por los valores de la variable independiente (Roy-García et al., 2019). En la Tabla 3 se muestran los valores del coeficiente de determinación y su respectivo criterio.

Valor de R <sup>2</sup>	Asociación
1	Positiva perfecta
0.9 - 1	Positiva muy fuerte
0.7 - 0.9	Positiva fuerte
0.5 - 0.7	Positiva moderada
0 - 0.5	Positiva baja
0	Nula

Tabla 3. V	alor y criterios de	l coeficiente	de determinación	(R <sup>2</sup> ) (Ferrero,	2020).
------------	---------------------	---------------	------------------	-----------------------------	--------

# **Capítulo 3. Resultados**

#### 3.1. Variables climáticas

La precipitación (P) y la evapotranspiración (ET) son los principales flujos del ciclo hidrológico que se relacionan con la variación del contenido de agua en el suelo ( $\theta$ ) en las diferentes temporadas del año (D'Odorico et al., 2018). Durante el periodo de estudio (junio 2015 – septiembre 2016), la P y la evapotranspiración de referencia medida (ET<sub>o med</sub>) se obtuvieron directamente de la estación climatológica Davis instalada en LHC con mediciones cada 30 minutos. La P se midió directamente en un pluviómetro y la ET<sub>o med</sub> se calculó de forma automática por la estación Davis (ecuación de Penman – Monteith modificada). Con esta información se estimó la P y ET<sub>o med</sub> en escala diaria.

La Figura 10a muestra los eventos de P que se registraron en 94 de los 488 días que componen el período de estudio, teniendo una P acumulada 298 mm. Los eventos de P predominantes fueron los que registraron una  $P \le 5 \text{ mm}$  día<sup>-1</sup> en 78 de los 94 días (83%), los eventos de P menos habituales fueron entre 5 < P < 10 mm día<sup>-1</sup> con 6 (6%) y los eventos con una  $P \ge 10 \text{ mm}$  día<sup>-1</sup> fueron 10 (11%).

La P máxima mensual se presentó en diciembre 2015 (40 mm), enero, marzo y abril 2016 (127, 30 y 30 mm, respectivamente) (Figura 10b). En el mes de febrero 2016 registró una P = 1.8 mm (Figura 10b). El 19 y 20 de septiembre 2016 se presentaron dos eventos de P acumulando 8.4 y 14 mm, respectivamente (Figura 10b). Los meses más secos se presentaron de junio a septiembre 2015 y de junio a agosto 2016 los cuales no sobrepasan el milímetro de P mensual (Figura 10b).

La  $ET_{o med}$  promedio diaria y acumulada durante el periodo de estudio fue de 4.4 mm y 2155 mm, respectivamente. De acuerdo con Allen et al. 1998 en climas áridos, semiáridos y cálidos el rango reportado de  $ET_o$  es de 2 a 8 mm día<sup>-1</sup>, por lo que la  $ET_o$  med promedio está en el rango establecido.

Durante el periodo de estudio el promedio mensual de  $ET_{o med}$  fue de 135 mm. Los valores mínimos mensuales se presentaron en los meses de noviembre 2015, diciembre y enero 2016 (89, 72 y 63 mm, respectivamente) (Figura 10b). Durante los periodos de junio a octubre 2015 y junio a septiembre 2016 la  $ET_{o med}$  supero los 120 mm mes<sup>-1</sup> (Figura 10b). Mientras que para el periodo de febrero a mayo 2016 varió de 109 a 118 mm mes<sup>-1</sup>.



**Figura 10.** (a) Precipitación (P) y evapotranspiración de referencia medida ( $ET_{o med}$ ) diaria; (b) P y  $ET_{o med}$  mensual estimadas por la estación climática Davis. P está representada por barras azules,  $ET_{o med}$  por la línea negra continua y el promedio de  $ET_{o med}$  (diaria y mensual) está representada por la línea punteada negra.

Se utilizaron otras variables climáticas entre ellas la humedad relativa mínima ( $RH_{min}$ ) y la velocidad promedio del viento a dos metros de altura ( $u_2$ ) medidas por la estación Davis para calcular el coeficiente de transpiración en el máximo desarrollo de la vegetación ( $K_{cb}$  full) y el valor máximo del coeficiente de vegetación ( $K_{c max}$ ) en la Sección 3.4.

# 3.2. Propiedades físicas del suelo

Se calcularon los coeficientes de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) y de reducción de la evaporación en el suelo (K<sub>e</sub>) con la estimación de las propiedades físicas del suelo ( $\theta$ ,  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{wp}$  y la textura del suelo).

En la Figura 11a y b se observa el  $\theta$  de los primeros 0.2 m de profundidad y la P registrada durante el periodo de estudio en el LHC y en el sitio de la EEC. De manera general, el  $\theta$  aumenta cuando se presentan eventos de P (dic a mar) y el  $\theta$  disminuye durante la temporada seca y la transición de seca - húmedo. Durante la temporada seca los valores de  $\theta$  no sobrepasan los 0.10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, mientras que en la temporada húmeda el valor de  $\theta$  incrementa hasta alcanzar valores de 0.25 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>

En el LHC se calculó un promedio del  $\theta_{fc}$  de 0.22 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> a partir del procesamiento de las muestras de suelo (Tabla 4). Este valor representa el límite superior de  $\theta$  disponible para la vegetación. Se estimó un valor para el  $\theta_{wp}$  de 0.06 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> con los datos de la sonda de perfil y el cálculo del  $\theta$  como límite inferior en el cual la vegetación ya no puede extraer agua de los poros del suelo. El máximo valor del Agua Total Disponible (TAW) en términos volumétricos se obtuvo con la diferencia de  $\theta_{fc}$  y  $\theta_{wp}$  (0.16 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) (Figura 11a). En el cálculo de K<sub>s</sub>, los valores de  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{wp}$  y TAW fueron constantes.

Se calculó el  $\theta_{fc}$  y de  $\theta_{wp}$  en el sitio de la EEC para comparar las diferencias con LHC siguiendo los procedimientos descritos en el párrafo anterior. Se estimó el mismo valor de  $\theta_{fc}$  en ambos sitios (0.22 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), sin embargo, el  $\theta_{wp}$  fue menor en el sitio EEC (0.03 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) (Figura 11b) y el TAW incrementó a 0.19 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.



**Figura 11.** (a) Contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta$ ) y precipitación (P) diaria medidos durante el periodo de estudio en el laboratorio de hidrología de campo (LHC;) y (b) la estación Eddy Covarianza (EEC).  $\theta$  representado por línea negra, P representada por barras azules, el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ) y en el punto de marchitez permanente ( $\theta_{wp}$ ) representados por la línea discontinua negra y gris, respectivamente.

El análisis textural realizado en el LHC y EEC reveló que la textura del suelo es predominantemente arenosa, con un rango que va desde arena muy fina hasta arena muy gruesa. En todas las muestras procesadas se observó un porcentaje de contenido de arena que oscila entre 78 - 87%. El porcentaje restante corresponde a limos y arcillas, con un rango que varía entre 13 - 22% en el LUC e entre 17 - 22% en la EEC (Table 5).

22% en el LHC y entre 17 - 22% en la EEC (Tabla 5).

	Textura del suelo en el LHC		Textura del suelo en el sitio de la EEC			
ID	Arena (%)	Limo-arcilla (%)	Textura	Arena (%)	Limo- arcilla (%)	Textura
1	87	13	Arena media	80	20	Arena media
2	86	14	Arena gruesa	79	21	Arena media
3	85	15	Arena fina	78	22	Arena muy fina
4	78	22	Arena media	83	17	Arena gruesa
5	79	21	Arena muy fina	79	21	Arena media
6	86	14	Arena muy gruesa			
7	81	19	Arena media			
8	82	18	Arena muy gruesa			
9	80	20	Arena muy fina			

**Tabla 4.** Análisis textural del suelo en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC).

En promedio se calculó un 83% de arena y un 17% de limo-arcilla para el LHC y de un 80% de arena y 20% de limo – arcilla en el EEC indicando suelos con textura areno francosa (Figura 12).



**Figura 12.** Diagrama triangular de la clasificación de la textura de suelo propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). La línea roja y línea azul indican la clasificación del suelo en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC), respectivamente.

# 3.3. Análisis de la vegetación

Durante el monitoreo de la vegetación arbustiva en el LHC se cuantificó un total de 191 individuos considerando un radio de cinco metros para cada sitio de recolección de muestras de suelo (9 sitios) estimando una cobertura arbustiva del 30%, un 70% de suelo desnudo y un promedio de 21 individuos por sitio. En contraste, en el sitio de la EEC se cuantificó un total de 73 individuos en cinco sitios con una cobertura arbustiva del 40%, un 60% de suelo desnudo y un promedio de 15 individuos por sitio de recolección de muestras de suelo en un radio de cinco metros. En ambos sitios la altura promedio de la vegetación va de entre 1.5 y 1.85 m, respectivamente (Tabla 5). Las especies de plantas observadas incluyen *Ornithostaphylos* 

de San Nicolás).

Vegetación en el LHC			Vegetación en el sitio de la EEC		
ID	N° de individuos observados	Altura promedio (m)	N° de individuos observados	Altura promedio (m)	
1	11	1.90	15	2.10	
2	30	1.30	9	2.05	
3	10	1.10	17	1.80	
4	16	1.20	18	1.60	
5	25	1.50	14	1.65	
6	17	1.60			
7	23	1.60			
8	19	1.70			
9	40	1.40			

**Tabla 5.** Altura de los arbustos presentes alrededor de cada punto de muestreo en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC).

La medición del verdor de la vegetación derivado de los cuatro índices espectrales calculados (NDVI, NDRE, SAVI y MSAVI) durante las fechas seleccionadas en el periodo de jun 2015 a sep 2016 en el LHC se presenta en la Figura 13a y en la Figura 13b los de EEC. Los cuatro índices de vegetación presentan un comportamiento similar entre ellos durante las etapas de crecimiento de la vegetación. Por ejemplo, los valores menores se observan en la etapa inicial de la vegetación (EIV; de junio a noviembre), valores intermedios en la etapa de desarrollo de la vegetación (EDV; de diciembre a enero), valores máximos en la etapa de mediados (EMV; de febrero a marzo), valores intermedios en la etapa tardía (ETV; de abril a mayo), hasta comenzar de nuevo el ciclo anual con la EIV. En LHC y EEC, consistentemente el NDRE presentó los menores valores de verdor de la vegetación en todo el periodo con respecto a los otros VIs en un rango de 0.14 a 0.36. Los valores mínimos de NDRE van de 0.14 a 0.19 y se presentaron durante EIV, mientras que los máximos los observamos durante EMV en un rango de 0.18 a 0.36. Así mismo los cambios del verdor entre las etapas de la vegetación no es tan marcado como con los otros VIs. SAVI y MSAVI presentan los máximos valores de verdor de la vegetación en comparación con el NDVI y NDRE y son similares entre sí solo en la EIV. En las demás etapas SAVI es mayor que MSAVI en un 6% alcanzando valores máximos en la EMV (0.82 a 1). El NDVI presenta valores intermedios entre el MSAVI y el NDRE, con valores mínimos del verdor de la vegetación durante EIV (0.82 a 1) y los máximos durante EMV (0.82 a 1). Aunque los cuatro VIs presentan diferencias en sus valores, la evolución del verdor de la vegetación durante el periodo de estudio es consistente entre índices y sitios de estudio.

Al presentarse los primeros eventos de precipitación y humedecimiento del suelo (oct a dic), el NDRE presentó los valores más bajos respecto a los cuatro índices de vegetación (0.14 a 0.18), mientras que tanto SAVI como MSAVI presentaron valores similares entre ellos (0.37 a 0.46) y mayores respecto a NDRE y NDVI. En los meses de dic a feb cuando la cobertura de la vegetación tiende a aumentar, el NDRE mantiene los valores más bajos de los cuatro índices (0.26 a 0.34), mientras que SAVI presenta los valores mayores (0.82 a 1) y MSAVI tiene valores por debajo de estos (0.71 a 0.80). En el periodo de marzo – mayo 2016, ocurre el reverdecimiento de la vegetación, los valores de NDVI se mantienen mayores a los del NDRE y menores a los de MSAVI (0.34 a 0.65). Finalmente, de mayo - octubre 2016 cuando se presenta el periodo de senescencia o marchitamiento de la vegetación, el NDRE volvió a presentar los valores más bajos respecto a los cuatro índices de vegetación (0.14 a 0.18), mientras que tanto SAVI como MSAVI presentaron valores similares entre ellos (0.32 a 0.60) y mayores respecto a NDRE y NDVI (Figura 13a). En el sitio de la estación EEC, los índices de vegetación para estas etapas presentaron un comportamiento similar, con valores de NDRE (0.12 a 0.28), SAVI (0.36 a 0.72), MSAVI (0.39 a 0.65) y NDVI (0.24 a 0.48). (Figura 13b). Para la fecha de enero 2016 en el sitio de la EEC no se cuenta una imagen satelital en el área de estudio, por lo que no se calcularon los índices de vegetación.



**Figura 13.** (a) Variación de los índices de vegetación en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (b) en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) para las fechas disponibles de RapidEye.

# 3.3.1. Evaluación del Índice de Área Foliar

La relación entre la superficie de la hoja y la superficie del terreno se calculó con el Índice de Área Foliar (LAI) mediante tres aproximaciones: LAI<sub>R</sub>, LAI<sub>G</sub> y LAI<sub>C-M</sub> para las cuales se requieren de un índice de vegetación el cual representa el verdor de la vegetación del sitio de estudio, en este caso LAI se calculó a partir del NDRE.

Se mantienen valores similares durante EVI y ETV para LAI<sub>R</sub> y LAI<sub>G</sub> (0.04 a 0.18 y 0.05 a 0.19), mientras que LAI<sub>C-M</sub> en estas mismas etapas tiene valores superiores (0.20 a 0.26) en el LHC y en EEC (Figura 14). En el caso del LHC los valores de LAI<sub>R</sub> LAI<sub>G</sub> y LAI<sub>C-M</sub> incrementan notablemente (0.25 a 0.96) en EDV y EMV (Figura 14a). Los valores de LAI mediante las tres aproximaciones durante el periodo anteriormente mencionado para el sitio de la EEC presentan un comportamiento similar entre sí (0.20 a 0.62) (Figura 14b), pero manteniendo valores menores a los calculados en el LHC. En el Anexo C se presentan los valores puntuales para cada sitio de estudio, fecha y LAI calculado.



Figura 14. (a) Variación del Índice de Área Foliar (LAI) en el LHC y (b) en el EEC para las imágenes satelitales RapidEye disponibles.

# 3.4. Estimación del coeficiente de vegetación (Kc)

De acuerdo con el manual de la FAO-56 los coeficientes de transpiración de la vegetación  $(K_{cb})$  y la evaporación del agua del suelo  $(K_e)$  se estiman por separado. En condiciones no estándar (poca disponibilidad de agua en el suelo y/o vegetación prístina) se incluye el coeficiente de estrés hídrico  $(K_s)$ , el cual atenúa el valor del coeficiente cultivo  $(K_c)$  por los efectos de la falta de agua.

El coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) muestra un comportamiento similar al contenido de agua en el suelo ( $\theta$ ) ya que K<sub>s</sub> depende de las características físicas del suelo como  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{wp}$  y el  $\theta$ . Por ejemplo, un valor de K<sub>s</sub> = 0 indica que no hay agua disponible en el suelo para la vegetación ( $\theta_{wp}$ ) y un valor de K<sub>s</sub> = 1 indica saturación en el suelo, donde la vegetación no puede hacer uso del agua disponible.

La comparación entre los valores de  $K_s$  en el LHC (Figura 15a) y en el sitio de la EEC (Figura 15b) muestran similitudes en el periodo donde se tienen datos de ambos sitios. Los valores más elevados de cada sitio se presentan en la etapa de desarrollo, mediados y tardía (0.75 a 0.99)

para los meses de enero – abril 2016. Los valores menores se observan en la etapa inicial y tardía en cada sitio de estudio (Anexo D y E).

En el periodo de jun a principios de noviembre 2015 y de principios de junio a principios de julio 2016 en el sitio de la EEC, no se cuenta con información de  $\theta$  por lo que no se realizó un análisis durante esos periodos.



**Figura 15.** (a) Coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) y variación del contenido de agua en el suelo ( $\theta$ ) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (b) en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC) durante el periodo de Jun 2015 a Sep 2016. Los puntos azules representan las fechas de imágenes satelitales disponibles (ISD) de RapidEye.

El coeficiente de transpiración de la vegetación ( $K_{cb}$ ) se calculó a partir del Índice de Área Foliar (LAI) y del coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la vegetación ( $K_{cb full}$ ). Al igual que en los parámetros anteriores la EIV tiene valores relativamente bajos y constantes de  $K_{cb}$  ya que no hay aporte de agua al sistema para el desarrollo de la vegetación. Los valores de  $K_{cb}$  incrementan durante la EDV (0.41 a 0.46), llegando a su máximo en la EMV (0.43 a 0.65). Tanto en LHC como en EEC, se presentó este patrón teniendo valores similares de  $K_{cb-R}$ ,  $K_{cb-G}$  y  $K_{cb-C-M}$ . (Figura 16a y b). Los valores de K<sub>e</sub> en EIV y ETV son similares para las tres aproximaciones calculadas (Figura 16c y d) con un rango de valores de 0.19 a 0.37 en el LHC. En el caso del sitio de la EEC para las mismas etapas tienen valores en el rango de 0.09 a 0.36. En el LHC para las EDV y EMV aunque presenta el mismo comportamiento los valores, hay diferencias donde K<sub>e-C-M</sub> presenta los valores mayores (0.30 a 0.97), K<sub>e-G</sub> los menores (0.30 a 0.92) y K<sub>e-R</sub> los intermedios (0.31 a 0.96). En la EEC no se presentan valores en EDV y los que se muestran en EMV no tienen una variación significativa entre ellos. El rango de valores de K<sub>cb full</sub> y K<sub>c max</sub> va de entre 1.05 a 1.21 y de 1.10 a 1.26, respectivamente para los dos sitios de estudio (Anexo F).



**Figura 16.** (a) Variación del coeficiente de transpiración de la vegetación (K<sub>cb</sub>) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (b) en el sitio de la estación Eddy Covarianza (EEC); (c) coeficiente de evaporación (K<sub>e</sub>) en el LHC y (d) en la EEC. EIV, EDV, EMV y ETV representan la etapa inicial, de desarrollo, de mediados y tardía de la vegetación, respectivamente.

El K<sub>c</sub> calculado incluyendo K<sub>e</sub> presenta valores en el rango de 0.08 a 1.41 en los dos sitios de estudio. Los resultados del K<sub>c</sub> calculado con el producto de K<sub>s</sub> y K<sub>cb</sub>, donde se omite K<sub>e</sub>, reveló valores menores (0.07 a 0.61) a los calculados incluyendo K<sub>e</sub>. Al igual que en los resultados anteriores K<sub>c</sub> presentan un comportamiento similar, disminuyendo los valores del coeficiente en EIV y ETV e incrementando en EDV y EMV. En el Anexo H se presentan los valores de K<sub>c</sub>

calculados incluyendo y omitiendo  $K_e$ . En las Figuras 17a y b se muestran los  $K_c$  calculados incluyendo  $K_e$  y en las Figuras 17c y d, se presentan los valores de  $K_c$  excluyendo  $K_e$ .

Los resultados de K<sub>c</sub> calculados con las tres ecuaciones de LAI tienen estrecha similitud (Figura 17). Los valores más bajos de K<sub>c</sub> se presentan en la EIV con un rango que va de 0.05 a 0.16 en el LHC (Figura 17c). Debido al incremento del verdor de la vegetación y el  $\theta$  los valores de K<sub>c</sub> para la EDV y EMV incrementan en los dos sitios de 0.41 a 0.61 (Figura 17c y d). Posteriormente, los valores disminuyen durante la ETV en el rango de 0.21 a 0.39 hasta llegar nuevamente a la EIV.

En el caso del sitio de la EEC se tiene información incompleta para las fechas de las imágenes satelitales disponibles debido a dos factores, el primero es la falta de datos de  $\theta$  (junio a noviembre 2015 y junio a julo 2016) (Figura 11b) y la segunda es debido a que no se encuentra disponible una imagen satelital para la zona de estudio en la fecha del 14 enero 2016 (Figura 15b).

El comportamiento de K<sub>c</sub> en el sitio de EEC es similar al que se presenta en el LHC (Figura 17c y d). Los valores en la EIV fueron de 0.07 a 0.11, mientras que los valores máximos se presentan en la EDV van de 0.32 a 0.46. Durante la EMV el coeficiente redujo sus valores entre 0.22 a 0.37 de tal manera que en la ETV se observan los valores mínimos que van de 0.06 a 0.26 (Figura 17 d).



**Figura 17.** Variación del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) en el LHC y en el sitio de la EEC. (a y c) metodología propuesta por Allen et al. (1998); (b y d) omitiendo K<sub>e</sub>.

# 3.5. Evaluación del modelo estadístico predictivo

El resultado del modelo predictivo se generó con un análisis estadístico de los valores de K<sub>c</sub> y el Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) mediante análisis de regresión lineal y el cálculo de los coeficientes de determinación. En cada sitio se evaluaron las asociaciones entre el K<sub>c</sub> y el NDRE (K<sub>c-R</sub> – NDRE; K<sub>c-G</sub> – NDRE; K<sub>c-C-M</sub> – NDRE). El NDRE se consideró como la variable independiente y K<sub>c</sub> la variable dependiente. En el análisis estadístico se consideraron

las fechas para las cuales coincide la información disponible en LHC y EEC (nov – dic 2015; feb – jun 2016 y jul – sep 2016), con el fin de comprar adecuadamente ambos sitios.

De acuerdo con la Tabla 3, en el LHC se presentaron asociaciones positivas muy fuertes  $(R^2 > 0.9)$  entre los K<sub>c</sub> y el NDRE. Por ejemplo, K<sub>c-R</sub> – NDRE (R<sup>2</sup> = 0.96; Figura 18a), K<sub>c-G</sub> – NDRE (R<sup>2</sup> = 0.96; Figura 18b) y K<sub>c-C-M</sub> – NDRE (R<sup>2</sup> = 0.93; Figura 18c). Los análisis para el EEC presentaron, aunque un menor grado de asociación en comparación con LHC, asociaciones positivas fuertes (0.7 > R<sup>2</sup> < 0.9). Por ejemplo, K<sub>c-R</sub> – NDRE (R<sup>2</sup> = 0.82; Figura 18d), K<sub>c-G</sub> – NDRE (R<sup>2</sup> = 0.83; Figura 18e) y K<sub>c-C-M</sub> – NDRE (R<sup>2</sup> = 0.74; Figura 18f).



**Figura 18.** Modelo predictivo del coeficiente de vegetación en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en el sitio de la Estación Eddy Covarianza (EEC). (a y d) Regresión lineal de NDRE y K<sub>c-R</sub> (LHC, EEC); (b y e) regresión lineal de NDRE y K<sub>c-C</sub> (LHC, EEC); (c y f) regresión lineal de NDRE y K<sub>c-C-M</sub> (LHC, EEC).

## 3.6. Evaluación de la evapotranspiración actual calculada

La evaluación de la  $ET_{a \ cal}$  se realizó al establecer el grado de asociación con  $ET_{a \ med}$ mediante los análisis de regresión lineal en LHC y EEC.  $ET_{a \ cal}$  se estimó con las tres aproximaciones de K<sub>c</sub> (Rodriguez, Galvincio y Clemente-Machado) para establecer comparaciones (Figura 19).

Los resultados al evaluar la  $ET_{a cal}$  con  $ET_{a med}$  en el LHC revelaron una asociación positiva fuerte en los tres casos ( $ET_{a cal}$  calculada con K<sub>c-R</sub>, K<sub>c-G</sub> y K<sub>c-C-M</sub>) con un R<sup>2</sup> = 0.78 (Figura 19a – c). Mientras que en el sitio EEC se encontró un grado de asociación positiva de moderada a fuerte ( $0.65 \ge R^2 \le 0.72$ ) entre la  $ET_{a cal}$  y  $ET_{a med}$  (Figura 19d – f).



**Figura 19.** (a - c) Evaluación de la ET<sub>a cal</sub> con la ET<sub>a med</sub> en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y (d - f) en el sitio de la Estación Eddy Covarianza (EEC).
#### Capítulo 4. Discusión

#### 4.1. Índices de vegetación

Los índices de vegetación evaluados NDVI, SAVI y MSAVI se derivan de las mismas bandas espectrales (NIR y R), sin embargo, SAVI y MSAVI incluyen factores de corrección cuyo objetivo es la reducción el brillo causado por la reflectancia del suelo desnudo, dando prioridad a la estructura del dosel y no a la medición de clorofíla (Rodríguez-Moreno & Bullock, 2013) por lo que SAVI y MSAVI presentaron valores más altos de verdor de la vegetación (0.32 a 1) en comparación con el NDVI y el NDRE (0.13 a 0.65) (Figura 13). Al igual que el NDVI, el NDRE proporciona una medida relativa de la cantidad de clorofíla activa que contiene la vegetación y es menos sensible a la influencia del suelo (Boiarskii, 2019), sin incorporar algún factor de corrección. Por lo tanto, el NDRE presenta los valores menores durante el periodo de estudio (Figura 13). Además, la banda del borde rojo que conforma el NDRE se enfoca en los cambios en el contenido de clorofíla de la vegetación, siendo más sensibles a mostrar estas variaciones (Boiarskii, 2019) en el sitio de estudio.

De acuerdo con Castro-Palafox (2016), la vegetación en los sitios LHC y EEC no presenta un crecimiento considerable durante la temporada de desarrollo (en términos de altura), sino un reverdecimiento de las hojas durante la EDV y EMV de la vegetación, seguido de la etapa tardía e inicial (periodo de senescencia foliar y marchitamiento) (Figura 13). El NDRE al ser sensible ante los cambios en el contenido de clorofila es el que mostró un mejor desempeño al caracterizar la evolución de vegetación en LHC y EEC (Figura 13), el cálculo de K<sub>c</sub> (Figura 17) y la estimación de ET<sub>a cal</sub> (Figura 19). Los estudios realizados en la vegetación de climas semiáridos Mediterráneos señalan un rango típico de valores de NDRE para este tipo de vegetación que va de 0.1 a 0.6 (Boiarskii, 2019; Vegliante-Arrieta, 2019; Bronson et al., 2020) y concuerdan con el rango de valores reportados en este trabajo que van de 0.16 a 0.37 en LHC y EEC.

# 4.2. Exclusión del coeficiente de evaporación del agua en el suelo en el cálculo del coeficiente de vegetación

En los dos sitios de estudio, se observó que los valores de evapotranspiración actual calculados ( $ET_{a \ cal}$ ), siguiendo el procedimiento señalado por Allen et al. (1998), a partir del coeficiente de vegetación ( $K_c = K_s * [K_{cb} + K_e]$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), sobreestimaron en al menos un 76% los valores de evapotranspiración medida ( $ET_{a \ med}$ ). En una revisión sistemática de los resultados, se observó que el K<sub>e</sub> en el cálculo del coeficiente de vegetación aumenta significativamente los valores de K<sub>c</sub>, teniendo un rango de 0.08 a 1.41, y consecuentemente aumentaba la evapotranspiración actual calculada ( $ET_{a \ cal}$ ) en ambos sitios de estudio (LHC y EEC).

Sin embargo, al evaluar y aplicar la omisión de K<sub>e</sub> en el cálculo de K<sub>c</sub> (K<sub>c</sub> = K<sub>s</sub> \* K<sub>cb</sub>), se observaron valores de K<sub>c</sub> en el rango de 0.05 a 0.61 en ambos sitios (LHC y EEC). Al aplicar el procedimiento señalado por Allen et al. (1998), excluyendo K<sub>e</sub>, se observó una subestimación de  $ET_{a cal}$  de tan solo el 5% respecto a la  $ET_{a med}$ . Por lo tanto, al excluir K<sub>e</sub> en el cálculo de K<sub>c</sub> se logró una mejor aproximación en la estimación de  $ET_{a cal}$  para modelar a la  $ET_{a med}$ .

De acuerdo con Allen et al. (1998), la evaporación del suelo debajo del dosel vegetal está incluida en K<sub>cb</sub> y puede no ser cuantificada explícitamente. Según las observaciones de Ferreira (2017) en climas semiáridos mediterráneos, se ha observado que la temporada de precipitación tiende a ocurrir cuando los niveles de radiación solar son más bajos. Este periodo se caracteriza por la presencia de masas de aire húmedo y temperaturas bajas, lo que resulta en una menor disponibilidad de energía para impulsar la evaporación directa en la superficie del suelo. En periodos en los que la energía no es una limitante, pero si lo es la disponibilidad de agua en el suelo, el resultado es una evaporación del suelo baja o nula (Carvalho et al., 2019). Por lo tanto,

debajo del dosel vegetal al estar contemplada en el cálculo de  $K_{cb}$  y excluir el término  $K_e$  en el cálculo de  $K_c$  para el chaparral en esta zona semiárida Mediterránea.

En la Figura 20 se presentan las regresiones lineales que relacionan la  $ET_{a med}$  con la  $ET_{a}$ <sub>cal</sub>, aplicando la metodología propuesta por Allen et al. (1998) (Figura 20a y c) y omitiendo K<sub>e</sub> (Figura 20b y d). En la Figura 20, las líneas discontinuas de color naranja representan la tendencia que el modelo debería seguir si los valores estimados fueran perfectos en comparación con los valores medidos por la EEC. Al comparar los resultados de los modelos en la Figura 20, se observa que el grado de asociación entre  $ET_{a cal}$  y  $ET_{a med}$  disminuye al incluir K<sub>e</sub> en el cálculo de la  $ET_{a}$ (Figura 20a y c) (R<sup>2</sup> LHC = 0.74; R<sup>2</sup> EEC = 0.55). Mientras que, en las Figuras 20b y d se muestra un mejor ajuste de los valores de la  $ET_{a cal}$  a la línea de tendencia que representa los valores ideales en comparación con la  $ET_{a med}$  mostrando un grado de asociación positiva fuerte (R<sup>2</sup> LHC = 0.78; R<sup>2</sup> EEC = 0.72).



**Figura 20.** Modelos de regresión lineal entre la evapotranspiración actual medida ( $ET_{a med}$ ) y la evapotranspiración actual calculada ( $ET_{a cal}$ ). (a y c) aplicando la metodología propuesta por Allen et al. (1998); (b y d) omitiendo K<sub>e</sub>. La línea discontinua naranja representa los valores ideales que debería de tomar el modelo.

#### 4.3. Modelo predictivo para el cálculo del coeficiente de vegetación

Los resultados de la regresión lineal entre el NDRE y el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) revelaron una correlación positiva muy fuerte, con  $0.93 \le R^2 \le 0.96$  en LHC y una correlación moderada a fuerte, con  $0.74 \le R^2 \le 0.83$  en EEC (Figura 19). Esto significa que los modelos de regresión lineal utilizados en el estudio han logrado explicar entre el 93% y el 96% de la variabilidad observada entre el NDRE y K<sub>c</sub> en LHC y entre el 74% y el 83% en EEC. Este hallazgo es coherente con los estudios previos de Er-Raki et al. (2013) y Reyes-González et al. (2020), donde obtuvieron R<sup>2</sup> de 0.63 y 0.89, respectivamente, al evaluar la relación entre el K<sub>c</sub> y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) en cultivos de vid y en suelos secos en una zona climática similar a la de este trabajo de investigación. Es relevante destacar que tanto Er-Raki et al. (2013) como Reyes-González et al. (2020) indican que el modelo lineal puede ser utilizado con precisión para estimar ET<sub>a</sub> al multiplicar el K<sub>c</sub> y ET<sub>o</sub> en zonas semiáridas, debido a la fuerte relación entre el índice de vegetación y el coeficiente de cultivo.

#### Capítulo 5. Recomendaciones de Manejo

El conocer a fondo las variables que componen la dinámica del ciclo hidrológico en una cuenca, brinda información sobre la distribución del recurso en el ecosistema, permitiendo comprender el papel del agua en la vida de los animales, las plantas y la sociedad (Tuñon-Colom, 2000). El cambio climático, el cambio en el uso del suelo y la deforestación son algunos de los factores que hacen que la gestión del recurso hídrico se vuelva un problema complejo, aunado al aumento de la población y la urbanización .

Para conocer y comprender la dinámica del agua en una cuenca hidrológica se introduce el concepto de balance hídrico (BH). El BH toma en cuenta las entradas y salidas de agua y el cambio en el almacenamiento en la cuenca; estos componentes del ciclo hidrológico están representados por el principio de conservación de la masa (cambio en el almacenamiento = entradas – salidas). En la porción central de la subcuenca El Mogor, la lluvia es la única entrada de agua al sistema y las salidas principales (o pérdidas), son por el proceso de evapotranspiración (evaporación + transpiración) y el escurrimiento superficial. El cálculo del BH permite estimar los volúmenes del recurso hídrico y así desarrollar planes de manejo y gestión del recurso a nivel de cuenca.

Teniendo en consideración lo dicho anteriormente, esta tesis se enfocó en generar modelos de regresión lineal para calcular un coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) del chaparral en la subcuenca El Mogor, integrando información espectral de la vegetación, características físicas del suelo, y variables climáticas de la región. Los resultados representan los valores del verdor de la vegetación natural, el contenido de humedad en el suelo, el estrés hídrico, la evaporación del agua en el suelo y la transpiración de la vegetación en los pixeles seleccionados de las imágenes satelitales, traducidos en un solo coeficiente de la vegetación (K<sub>c</sub>) que se modifica con respecto a las variaciones estacionales y de humedad del suelo. Al multiplicar K<sub>c</sub> por la evapotranspiración de

evapotranspiración actual, que representan la pérdida real por transpiración de las plantas y evaporación del agua del suelo.

La importancia de este trabajo para la gestión de las zonas semiáridas con vegetación del tipo de chaparral (presente en la porción central de la subcuenca El Mogor) consiste en la aplicación de los modelos generados para simplificar el cálculo de la ET<sub>a</sub> utilizando información espectral satelital y la evapotranspiración de referencia (derivada de estaciones climáticas). Los resultados permiten estimar ET<sub>a</sub> de una forma relativamente simplificada y confiable en la zona de estudio y posiblemente en otras zonas con vegetación de chaparral.

Por lo general, ET se calcula mediante métodos empíricos, los cuales sobrestiman su valor teniendo como resultados variaciones importantes al finalizar la integración de las variables del BH (Sánchez-Martínez & Carvacho-Bart, 2011) o bien se requieren métodos difíciles de costear y mantener (Método Eddy Covarianza) (Er-Raki et al., 2013).

Considerando los hallazgos del presente trabajo de investigación se pueden ofrecer algunas recomendaciones de manejo que ayudarán en el cálculo de ET<sub>a</sub> en el sitio de estudio y en zonas con vegetación similar, complementando las mediciones directas realizadas por estaciones climáticas de referencia (estación Eddy Covarianza y estación Davis). El modelo resultante tiene varias aplicaciones prácticas que pueden beneficiar a la gestión de los recursos hídricos en zonas semiáridas dominadas por chaparral (Figura 18a). Algunas de las aplicaciones prácticas en diversos ámbitos incluyen:

 Monitoreo de la salud vegetal: De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de tesis y el trabajo realizado por Vegliante-Arrieta (2019), el uso del Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) puede servir como indicador del estado de la vegetación. Además, este indicador puede ser de gran utilidad en el monitoreo de la salud vegetal en áreas dominadas por el chaparral.

- Conservación y restauración de ecosistemas: La capacidad de monitorear la salud vegetal utilizando indicadores como el NDRE permite a los gestores de ecosistemas identificar áreas susceptibles o afectadas por un déficit hídrico en el suelo y así tomar medidas preventivas o de restauración (Aguilar-Garavito & Ramírez, 2015).
- Evaluación del cambio climático: El uso del modelo estadístico predictivo de K<sub>c</sub> y la estimación de la ET<sub>a</sub> pueden ayudar en el monitoreo de la variabilidad climática y sus efectos en las zonas semiáridas mediterráneas naturales dominadas por chaparral, proporcionando información sobre los posibles cambios en la disponibilidad de agua en el suelo y el comportamiento de la vegetación en respuesta a los cambios en la climatología (Sánchez & Reyes, 2015).
- Gestión del agua: El modelo estadístico predictivo de K<sub>c</sub> y el posterior cálculo de ET<sub>a cal</sub> pueden ayudar en la gestión del agua al proporcionar estimaciones precisas de la demanda hídrica del suelo y la vegetación nativa (Ramírez-García et al., 2016).

Finalmente, se recomienda ampliar el periodo de estudio, esto representará una mayor cantidad de información del contenido de agua en el suelo, información climatológica e imágenes satelitales. La ampliación del periodo de estudio y la recopilación de datos más detallados tienen un propósito fundamental: generar un modelo estadístico predictivo de K<sub>c</sub>. Este enfoque se basa en la idea de que una mayor cantidad de información, obtenida a través de imágenes satelitales, información climatológica y contenido de agua en el suelo, probablemente aumentará la similitud del modelo con el índice de vegetación. Esta mejora en la precisión del modelo es esencial, ya que K<sub>c</sub> se integra en el cálculo de ET<sub>a</sub>, que, a su vez, desempeña un papel crucial en el cálculo del balance hídrico. Por lo tanto, al considerar y analizar esta información detallada, podemos establecer un modelo predictivo mucho más confiable para K<sub>c</sub>.

#### **Capítulo 6. Conclusiones**

En esta tesis se analizó la relación que existe entre el contenido de humedad en el suelo, el verdor de la vegetación y la climatología para desarrollar un modelo predictivo del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>), con el que se calculó la ET<sub>a</sub> para un sitio con clima semiárido mediterráneo con vegetación del chaparral, dicho la anterior se puede concluir lo siguiente:

- El Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) tiene una mejor respuesta respecto a la variación del coeficiente de vegetación y representa el estado de la vegetación para el chaparral en el sitio de estudio.
- La omisión del coeficiente de evaporación de suelo (K<sub>e</sub>) mejoró la asociación entre la ET<sub>a</sub> calculada (14.8 mm acumulados) y la medida (16.1 mm acumulados) con respecto a k<sub>c</sub> aplicando la metodología de Allen et al. (1998) (ET<sub>a cal</sub> = 33.4 mm acumulados).
- El modelo predictivo de K<sub>c</sub> generado de la regresión lineal entre la aplicación de la metodología propuesta por Allen et al. (1998) y el NDRE presentó un R<sup>2</sup> mínimo de 0.93 y 0.74 para el laboratorio de hidrogeología de campo y para la estación Eddy Covarianza, respectivamente indicando que el NDRE explica en un alto porcentaje el K<sub>c</sub>.
- Los resultados del modelo estadístico revelaron que los valores calculados y medidos de ET<sub>a</sub> presentan una buena relación, donde la línea de tendencia de la regresión lineal generada y la línea de tendencia que deben de tomar para los valores ideales son semejantes (Figura 20).
- Finalmente se puede decir que el modelo generado por Galvincio et al. (2013) presenta una mayor asociación en el LHC ( $R^2 = 0.96$ ) y en el sitio de EEC ( $R^2 = 0.83$ ). Permite calcular la ET<sub>a</sub> con información de humedad del suelo, información espectral satelital e información de estaciones climáticas con una fuerte asociación a los valores de ET<sub>a</sub> medidos.

## Literatura citada

Adame, O. (2018). La historia detrás del Valle de Guadalupe, la mayor región vinícola de México. WARP.la. 25 de febrero de 2021. http://warp.la/la-historia-detras-del-valle-guadalupe-la-mayor-region-vinicola-mexico-180895

Aguilar-Garavito, M., & Ramírez, W. (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica. 254. 13 de agosto de 2023. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9281/ monitoreo\_restauracion\_baja\_1.pdf?sequence=1

Ajami, H. (2021). Geohydrology: Global Hydrological Cycle. En D. Alderton & S. A. Elias (Eds.), Encyclopedia of Geology (Second Edition) (pp. 393-398). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12387-5

Allen, R., Pereira, L., Dirk, & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration. 56, 327.

Amazirh, A., Merlin, O., Er-Raki, S., Bouras, E., & Chehbouni, A. (2021). Implementing a new texture-based soil evaporation reduction coefficient in the FAO dual crop coefficient method. Agricultural Water Management, 250, 106827. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106827

Ayyoub, A., Er-Raki, S., Khabba, S., Merlin, O., Ezzahar, J., Rodriguez, J. C., Bahlaoui, A., & Chehbouni, A. (2017). A simple and alternative approach based on reference evapotranspiration and leaf area index for estimating tree transpiration in semi-arid regions. Agricultural Water Management, 188, 61-68. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.005

Barrantes-Moreno, G. (2012). Evaluación del servicio ambiental hidrico en la cuenca del Río Tempique (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas. 11 de agosto de 2022. https://doi.org/10.15332/rl.v0i2.668

Bastos-Lyra, G., De Souza, J., Da Silva, E., Bastos, G., Teodoro, I., Ferreira, R., & De Souza, R. (2016). Soil water stress co-efficient for estimating actual evapotranspiration of maize in northeastern Brazil: Soil water stress co-efficient for estimating maize evapotranspiration. Meteorological Applications, 23(1), 26-34. https://doi.org/10.1002/met.1516

Boiarskii, B. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. Journal of mechanics of continua and mathematical sciences, spl1(4). https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003

Breda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany, 54(392), 2403-2417. https://doi.org/10.1093/jxb/erg263

Bronson, K. F., Conley, M. M., French, A. N., Hunsaker, D. J., Thorp, K. R., & Barnes, E. M. (2020). Which active optical sensor vegetation index is best for nitrogen assessment in irrigated cotton? Agronomy Journal, 112(3), 2205-2218. https://doi.org/10.1002/agj2.20120

Brouwer, Goffeau, & Heibloem. (1985). Irrigation Water Management: Training Manual No. 1— Introduction to Irrigation. 23 de septiembre de 2020 https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e00.htm#

Burba, G. (2013). Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR Biosciences.

Cabello-Pasini, A., Macias-Carranza, V., & Mejía-Trejo, A. (2017). Efecto del mesoclima en la maduracion de uva nebbiolo (Vitis vinifera) en el Valle de Guadalupe, Baja California, México. Agrociencia, 51(6), 617-633.

Callahan, C. W., Elansari, A. M., & Fenton, D. L. (2019). Chapter 8—Psychrometrics. En E. M. Yahia (Ed.), Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities (pp. 271-310). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00008-0

Campbell, G. S. (2021). The researcher's complete guide to Leaf Area Index (LAI). METER. 9 de mayo de 2022. https://www.metergroup.com/en/meter-environment/education-guides/researchers-complete-guide-leaf-area-index-lai

Carvalho, K. S., Vianna, M. S., Nassif, D. S. P., Costa, L. G., Folegatti, M. V., & Marin, F. R. (2019). Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. Australian Journal of Crop Science, 13(08):2019, 1362-1368. https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.08.p1814

Castro-Palafox, F. (2016). El matorral costero de baja california: un acercamiento a la problemática para su conservación. COLEF. 26 de enero de 2022. https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Castro-Palafox-Flor-de-Liz.pdf

Clemente-Machado, C. (2014). Alterações na superfície do parque nacional do catimbau (pe - brasil): Universidade Federal de Pernambuco. 11 de agosto de 2021. https://repositorio. ufpe.br/handle/123456789/13966

Coffer, M. M., Schaeffer, B. A., Zimmerman, R. C., Hill, V., Li, J., Islam, K. A., & Whitman, P. J. (2020). Performance across WorldView-2 and RapidEye for reproducible seagrass mapping. Remote Sensing of Environment, 250, 112036. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112036

CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guadalupe (0207), Estado de baja california (p. 31). CONAGUA. 23 de agosto de 2020. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\_Acuiferos\_18/BajaCalifornia/DR\_0207.pdf

CONAGUA. (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guadalupe (0207), Estado de Baja California. 17 de abril de 2021. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\_Acuiferos\_18/BajaCalifornia/DR\_0207.pdf

CONAGUA. (2013). Estaciones climatológicas. 4 de septiembre 2021. http://www.gob.mx/ conagua/acciones-y-programas/estaciones-climatologicas

Congedo, L. (2014). Semi-Automatic Classification Plugin User Manual. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1219.3524

Cotler-Ávalos, H., Garrido-Pérez, A., Luna-González, N., Enríquez-Guadarrama, C., & Cuevas-Fernández, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología Fundación Gonzalo Río Arronte Pluralia Ediciones e Impresiones.

Daesslé, L. W., Mendoza-Espinosa, L. G., Camacho-Ibar, V. F., Rozier, W., Morton, O., Van Dorst, L., Lugo-Ibarra, K. C., Quintanilla-Montoya, A. L., & Rodríguez-Pinal, A. (2006). The hydrogeochemistry of a heavily used aquifer in the Mexican wine-producing Guadalupe Valley, Baja California. Environmental Geology, 51(1), 151-159. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0318-x

De Oliveira, R. A., Ramos, M. M., & de Aquino, L. A. (2015). Chapter 8—Irrigation Management. En F. Santos, A. Borém, & C. Caldas (Eds.), Sugarcane (pp. 161-183). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00008-6

Del Toro-Guerrero, F., & Kretzschmar, T. (2020). Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. Journal of Hydrology: Regional Studies, 27, 100653. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100653

Del Toro-Guerrero, F., Kretzschmar, T., & Bullock, S. (2019). Precipitation and topography modulate vegetation greenness in the mountains of Baja California, México. International Journal of Biometeorology, 63(10), 1425-1435. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01763-5

Del Toro-Guerrero, F., Vivoni, E., Kretzschmar, T., Bullock, S., & Vázquez, R. (2018). Variations in Soil Water Content, Infiltration and Potential Recharge at Three Sites in a Mediterranean Mountainous Region of Baja California, Mexico. Water, 10(12), 1844. https://doi.org/10.3390/w10121844

Del Toro-Guerrero, F., & Kretzschmar, T. (2016). Identificación de periodos de sequía histórica en una región de clima tipo semiárido mediterráneo. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 7(6), 1311-1320. https://doi.org/ 10.29312/remexca.v7i6.179

Del Toro-Guerrero, F., Kretzschmar, T., & Hinojosa, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. 5, 69-81.

Del Toro Guerrero, F. J.2012.Cuantificación del aporte hidrogeológico de la subcuenca El Mogor a la recarga del acuífero del Valle de Guadalupe, B.C., México.Tesis de maestría en ciencias.Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.118 pp.

Delta-T Devices Ltd. (2016). User Manual for the Profile Probe, Tipe PR2. 13 de dicimebre de 2020. https://delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/PR2\_user\_manual\_version\_5.0.pdf

D'Odorico, P., Davis, K. F., Rosa, L., Carr, J. A., Chiarelli, D., Dell'Angelo, J., Gephart, J., MacDonald, G. K., Seekell, D. A., Suweis, S., & Rulli, M. C. (2018). The Global Food-Energy-Water Nexus. Reviews of Geophysics, 56(3), 456-531. https://doi.org/10.1029/2017RG000591

EOS. (2019). NDRE Index: Vegetation Analysis For Mid And Late Season Crops. 11 de abril de 2020. https://eos.com/industries/agriculture/ndre/

Er-Raki, S., Rodriguez, J. C., Garatuza-Payan, J., Watts, C. J., & Chehbouni, A. (2013). Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. Agricultural Water Management, 122, 12-19. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.007

Fang, H., & Liang, S. (2014). Leaf Area Index Models☆. En Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09076-X

FAO. (2006). 6. Textura del suelo. 23 de septiembre de 2020. https://www.fao.org/fishery/static/FAO\_Training/FAO\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

FAO. (2020). ¿Qué son las zonas secas? | Forestería en las tierras secas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. http://www.fao.org/dryland-forestry/background/what-are-drylands/es/

Ferreira, M. (2017). Stress Coefficients for Soil Water Balance Combined with Water Stress Indicators for Irrigation Scheduling of Woody Crops. Horticulturae, 3(2), 38. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020038

Ferrero, R. (2020, julio). ¿Qué es la correlación estadística y cómo interpretarla? Máxima Formación. https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-la-correlacion-estadistica-y-como-interpretarla/

Flores Zavala, R.A.2016.Evaporación y transpiración según tres patrones espaciales y estacionales en un ecosistema mediterráneo en la subcuenca de El Mogor, Ensenada, Baja California.Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.36 pp.

Galvincio, J., Beserra de Moura, M. S., Freire da Silva, T. G., da Silva, B. B., & Naue, C. R. (2013). LAI Improved to Dry Forest in Semiarid of the Brazil. International Journal of Remote Sensing Applications, 3(4), 193. https://doi.org/10.14355/ijrsa.2013.0304.04

González-Cervantes, G., Chávez-Ramírez, E., González-Barrios, J. L., Dzul-López, A., Sánchez-Cohen, I., & Potisek-Talavera, M. C. (2012). Comparación de métodos para determinar la evapotranspiración y oportunidad de riego en nogal pecanero. Terra Latinoamericana, 30(1), 29-38.

Huete. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295-309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Irigoyen, A. I., Cabria, F., Maggiora, A. D., & Gardiol, J. M. (2006). Lámina de agua evaporable en suelos con aptitud agricola del partido de balcarce (Argentina). 3. 9 de junio de 2021. https://www.researchgate.net/publication/313840686\_Lamina\_de\_agua\_evaporable\_en\_suelos\_c on\_aptitud\_agricola\_del\_partido\_de\_Balcarce\_Argentina Jensen, M. E., & Allen, R. G. (Eds.). (2016). Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements (Second Edition). American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784414057

Kirkham, M. B. (2014). Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Nonlimiting Water Range. En Principles of Soil and Plant Water Relations (pp. 153-170). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420022-7.00010-0

Kokkotos, E., Zotos, A., & Patakas, A. (2020). Evaluation of Water Stress Coefficient Ks in Different Olive Orchards. Agronomy, 10(10), 1594. https://doi.org/10.3390/agronomy10101594

Kumari, K., & Yadav, S. (2018). Linear regression analysis study. Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences, 4, 33. https://doi.org/10.4103/jpcs.jpcs\_8\_18

Kurczyn-Robledo, J. A., Kretzschmar, T., & Hinojosa, A. (2007). Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. Revista mexicana de ciencias geológicas, 24(1), 1-14.

López-Lambraño, A., Fuentes, C., GonzálezSosa, E., & López-Ramos, A. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. Tecnología y Ciencias del Agua, VIII(4), 37-56.

Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia Torres, Y., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. Terra Latinoamericana, 34(1), 39-59.

Majumdar, S., Chatterjee, U., David Raj, A., & Kumar, S. (2023). Chapter 16 - Decline in vegetation cover over Kolkata city: An environmental concern from remote-sensing perspective. En U. Chatterjee, B. Pradhan, S. Kumar, S. Saha, M. Zakwan, B. D. Fath, & D. Fiscus (Eds.), Water, Land, and Forest Susceptibility and Sustainability (Vol. 1, pp. 453-474). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91880-0.00003-9

Planet. (2016). RapidEye TM Mosaics Product Specifications. Planet. 16 de junio de 2021. https://www.planet.com/assets/pdfs/1606.08\_Spec\_Sheet\_RE%20Mosaics\_Letter\_ENG\_FINAL. pdf

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 48(2), 119-126. https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1

Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017). Planning and evaluation of irrigation projects. En Planning and Evaluation of Irrigation Projects (pp. 505-523). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811748-4.00017-0

Reyes-González, A., Sanchez-Duarte, J., Rodríguez-Moreno, V., Hernández-Leal, E., & Franco Gaytán, I. (2020). Development of crop coefficient for forage safflower based on vegetation indices. Tecnología y Ciencias del Agua, 11, 39-80. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-06-02

Robertson, B. B., Almond, P. C., Carrick, S. T., Penny, V., Chau, H. W., & Smith, C. M. S. (2021). Variation in matric potential at field capacity in stony soils of fluvial and alluvial fans. Geoderma, 392, 114978. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114978

Rodríguez, C. (2006). Análisis retrospectivo del impacto ambiental en recintos portuarios: El caso de los puertos marítimos de Ensenada y Sauzal de Rodríguez, B.C., México. Tesis de Maestría en Ciencias. El Colegio de la Frontera Norte. 92 pp.

Rodríguez Bastarrachea, A. 2019. Asociación entre fenología foliar, crecimiento de tallos y patrones espectrales foliares en diez especies de vegetación mediterráneas. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 70 pp.

Rodríguez-Moreno, V., & Bullock, S. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense\* Comparison of vegetation indexes in the Sonoran desert incorporating soil and moisture indicators application estimates of LAI. 14. 12 de febrero de 2021. and to https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n4/v4n4a10.pdf

Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: No toda correlación implica causalidad. Revista alergia México, 66(3), 354-360. https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651

Sadí-Laporte, M. (2014). Un balance hídrico: Requisitos indispensables para una gestión integral del agua. https://www.ucr.ac.cr/medios/documentos/2014/sadi\_laporte.pdf

Sánchez, L., & Reyes, O. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 3 de agosto de 2023. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39781/1/S1501265 es.pdf

Sánchez-Martinez, M., & Carvacho-Bart, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Revista de geografía Norte Grande, 50, 171-186. https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000300010

Santiago-Rodríguez, S., Arteaga-Ramírez, R., Sangerman-Jarquín, D. M., Cervantes-Osornio, R., & Navarro Bravo, A. (2012). Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 3(8), 1535-1549. https://doi.org/10.29312/remexca.v3i8.1319

Segura-Castruita, M. A., & Ortiz-Solorio, C. A. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. Tecnología y ciencias del agua, 08(3), 93-110. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-06

Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en venezuela: ¿Cuál método utilizar? Bioagro, 20(2), 89-95.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127-150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Tuñon-Colom, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. 16 de junio de 2021. https://www.tdx.cat/handle/10803/10405

UNESCO. (2021). Estrategias para el aumento de la disponibilidad y mejoramiento de la eficiencia hídrica en América Latina y El Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 23 de enero de 2021. https://es.unesco.org/sites/default/files/ estrategias\_hidricas\_23-04-21\_web\_0.pdf

USDA. (2022). Soil Texture Calculator NRCS Soils. 5 de mayo de 2021. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2\_054167

USGS. (2022). What is remote sensing and what is it used for? U.S. Geological Survey. 9 de septiembre de 2021. https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used

Vegliante-Arrieta, D. (2019). Análisis espacio-temporal de la vegetación en la cobertura vegetal presente en la subcuenca El Mogor, municipio de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Baja California.89 pp.

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., López-Morales, F., Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. Idesia (Arica), 38(4), 99-107. https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099

Villarreal-Rodríguez, S. (2012). Variabilidad interanual de la evapotranspiración en dos ecosistemas semiáridos con patrones de precipitación distintos. http://www.mundonano. unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/56907

Walker, W. R. (1989). Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems (FAO irrigation and drainage paper). Food & Agriculture Org. 9 de marzo de 2021. https://www.fao.org/3/T0231E/t0231e00.htm#Contents

Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. The Journal of Geology, 30(5), 377-392.

Yahia, E. M. (2019). Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities Chapter 1—Introduction. En Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities (pp. 1-41). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00001-8

Yost, J. (2016). Soil carbon and soil moisture variation in cropped fields of the Central Sands in Wisconsin. 19 de septiembre de 2021. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32769.92008

### Anexos

Características de la misión	Información				
N° de satélites	5				
Vida útil	7	años			
Altitud de la órbita	630 km (órbita	a heliosincrónica)			
	Nombre	Longitud de onda			
		(nm)			
	Azul	440 - 510			
Bandas espectrales	Verde	520 - 590			
Dandas espectrales	Rojo	630 - 685			
	Borde del rojo	690 - 730			
	Infrarrojo cercano	760 - 850			
Tipo de sensor	Push Broom	Multiespectral			
Tamaño del píxel	6.5 m				
Tamaño del píxel (ortorrectificado)	5 m				
Ancho del barrido	77	7 km			

Anexo A. Información de la misión RapidEye (modificada de Coffer et al., 2020 y Planet, 2016).

**Anexo B.** Índices de vegetación (VI) promedios calculados en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la estación Eddy Covarianza (EEC) para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye. NDRE es el índice de diferencia normalizada de borde rojo, NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, SAVI es el índice de vegetación ajustado al suelo, MSAVI es el índice de vegetación ajustado al suelo modificado.

Facha		VI en	el LHC		V	VI en el sitio de la EEC			
геспа	NDRE	NDVI	SAVI	MSAVI	NDRE	NDVI	SAVI	MSAVI	
03/jun/2015	0.15	0.25	0.36	0.38	0.18	0.31	0.47	0.47	
18/jun/2015	0.15	0.24	0.42	0.44	0.15	0.26	0.39	0.41	
13/jul/2015	0.14	0.22	0.42	0.44	0.15	0.26	0.38	0.40	
06/sep/2015	0.13	0.22	0.32	0.35	0.14	0.26	0.39	0.41	
24/oct/2015	0.14	0.23	0.37	0.40	0.16	0.28	0.41	0.43	
17/nov/2015	0.18	0.28	0.44	0.46	0.16	0.29	0.44	0.45	
08/dic/2015	0.16	0.25	0.39	0.41	0.12	0.24	0.36	0.39	
14/ene/2016	0.26	0.50	0.82	0.71	-	-	-	-	
06/feb/2016	0.32	0.59	0.89	0.75	0.24	0.41	0.62	0.58	
17/feb/2016	0.34	0.62	1.00	0.80	0.27	0.44	0.67	0.61	
09/mar/2016	0.37	0.65	0.94	0.77	0.28	0.48	0.72	0.65	
19/mar/2016	0.34	0.62	0.95	0.77	0.25	0.47	0.70	0.64	
03/abr/2016	0.27	0.51	0.81	0.70	0.26	0.46	0.69	0.63	
04/may/2016	0.20	0.34	0.60	0.53	0.18	0.34	0.51	0.51	
04/jun/2016	0.17	0.29	0.51	0.51	0.18	0.31	0.47	0.48	
13/jun/2016	0.17	0.30	0.46	0.47	0.18	0.34	0.52	0.52	
02/jul/2016	0.18	0.28	0.49	0.49	0.19	0.32	0.48	0.49	
16/jul/2016	0.14	0.23	0.32	0.35	0.18	0.32	0.48	0.48	
29/jul/2016	0.18	0.27	0.41	0.43	0.16	0.29	0.43	0.45	
06/ago/2016	0.16	0.25	0.49	0.50	0.17	0.24	0.37	0.44	
25/ago/2016	0.16	0.25	0.41	0.43	0.17	0.29	0.44	0.45	
04/sep/2016	0.16	0.26	0.39	0.42	0.18	0.33	0.49	0.49	

**Anexo C.** Índices de Área Foliar (LAI) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la estación Eddy Covarianza (EEC) para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye. LAI<sub>R</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Rodríguez-Moreno y Bullock, (2013), LAI<sub>G</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Galvincio et al., (2013), LAI<sub>C-M</sub> es el Índice de Área Foliar calculado mediante Clemente-Machado, (2014).

Faaba	Ι	AI en el LHC	C	LAI e	n el sitio de la	EEC
геспа	LAI <sub>R</sub>	LAIG	LAI <sub>C-M</sub>	LAI <sub>R</sub>	LAIG	LAI <sub>C-M</sub>
03/jun/2015	0.11	0.11	0.23	0.17	0.19	0.26
18/jun/2015	0.09	0.10	0.22	0.10	0.11	0.23
13/jul/2015	0.08	0.08	0.21	0.10	0.11	0.23
06/sep/2015	0.05	0.06	0.20	0.09	0.10	0.22
24/oct/2015	0.08	0.09	0.22	0.12	0.13	0.23
17/nov/2015	0.18	0.19	0.26	0.14	0.15	0.24
08/dic/2015	0.13	0.14	0.24	0.04	0.05	0.20
14/ene/2016	0.44	0.52	0.41	-	-	-
06/feb/2016	0.65	0.77	0.57	0.38	0.45	0.37
17/feb/2016	0.73	0.85	0.63	0.45	0.54	0.42
09/mar/2016	0.85	0.96	0.73	0.52	0.62	0.47
19/mar/2016	0.72	0.83	0.62	0.41	0.49	0.40
03/abr/2016	0.46	0.55	0.43	0.44	0.52	0.41
04/may/2016	0.25	0.28	0.30	0.20	0.22	0.27
04/jun/2016	0.16	0.17	0.25	0.18	0.20	0.26
13/jun/2016	0.17	0.18	0.26	0.20	0.22	0.27
02/jul/2016	0.17	0.19	0.26	0.21	0.23	0.28
16/jul/2016	0.09	0.10	0.22	0.20	0.22	0.27
29/jul/2016	0.19	0.20	0.27	0.12	0.13	0.24
06/ago/2016	0.12	0.13	0.24	0.15	0.16	0.25
25/ago/2016	0.13	0.14	0.24	0.16	0.17	0.25
04/sep/2016	0.14	0.15	0.24	0.20	0.21	0.27

**Anexo D.** Coeficientes calculados en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC).  $K_s$  es el coeficiente de estrés hídrico,  $K_{cb}$  es el coeficiente de transpiración de la vegetación,  $K_e$  es el coeficiente de evaporación en el suelo.

Facha				LHC			
геспа	Ks	Kcb-R	Kcb-G	Kcb-C.M	Ke-R	Ke-G	Ке-С-М
03/jun/2015	0.21	0.27	0.27	0.34	0.20	0.20	0.19
18/jun/2015	0.46	0.26	0.27	0.35	0.28	0.28	0.26
13/jul/2015	0.37	0.25	0.25	0.33	0.24	0.23	0.21
06/sep/2015	0.20	0.23	0.24	0.33	0.22	0.22	0.20
24/oct/2015	0.18	0.26	0.26	0.34	0.22	0.22	0.20
17/nov/2015	0.26	0.32	0.32	0.37	0.21	0.21	0.20
08/dic/2015	0.24	0.29	0.29	0.35	0.22	0.22	0.20
14/ene/2016	0.99	0.42	0.46	0.41	0.90	0.85	0.91
06/feb/2016	0.99	0.56	0.61	0.52	0.86	0.80	0.91
17/feb/2016	0.95	0.59	0.64	0.55	0.71	0.66	0.76
09/mar/2016	0.93	0.61	0.65	0.57	0.58	0.54	0.63
19/mar/2016	0.89	0.56	0.60	0.52	0.53	0.49	0.57
03/abr/2016	0.75	0.48	0.52	0.46	0.44	0.41	0.45
04/may/2016	0.62	0.34	0.36	0.37	0.31	0.30	0.30
04/jun/2016	0.62	0.31	0.32	0.36	0.37	0.37	0.35
13/jun/2016	0.59	0.30	0.31	0.35	0.31	0.31	0.30
02/jul/2016	0.56	0.30	0.31	0.35	0.30	0.29	0.28
16/jul/2016	0.53	0.26	0.26	0.34	0.31	0.31	0.28

Faaba	LHC								
геспа	Ks	K <sub>cb-R</sub>	K <sub>cb-G</sub>	K <sub>cb-C.M</sub>	K <sub>e-R</sub>	Ke-G	Ke-C-M		
29/jul/2016	0.50	0.31	0.32	0.36	0.27	0.26	0.25		
06/ago/2016	0.46	0.28	0.28	0.34	0.25	0.25	0.24		
25/ago/2016	0.40	0.28	0.29	0.35	0.24	0.24	0.23		
04/sep/2016	0.36	0.29	0.29	0.34	0.22	0.22	0.21		

**Anexo E.** Coeficientes calculados en la estación Eddy Covarianza (EEC). K<sub>s</sub> es el coeficiente de estrés hídrico, K<sub>cb</sub> es el coeficiente de transpiración de la vegetación, K<sub>e</sub> es el coeficiente de evaporación en el suelo.

E L.				EEC			
Fecha	Ks	K <sub>cb-R</sub>	K <sub>cb-G</sub>	K <sub>cb-C.M</sub>	K <sub>e-R</sub>	K <sub>e-G</sub>	Ke-C-M
03/jun/2015	-	0.31	0.32	0.36	-	-	-
18/jun/2015	-	0.27	0.28	0.35	-	-	-
13/jul/2015	-	0.26	0.27	0.34	-	-	-
06/sep/2015	-	0.26	0.27	0.34	-	-	-
24/oct/2015	-	0.28	0.29	0.36	-	-	-
17/nov/2015	0.29	0.29	0.30	0.36	0.12	0.12	0.11
08/dic/2015	0.33	0.23	0.24	0.33	0.14	0.14	0.13
14/ene/2016	0.98	-	-	-	-	-	-
06/feb/2016	0.97	0.44	0.47	0.43	0.96	0.92	0.97
17/feb/2016	0.89	0.47	0.52	0.46	0.63	0.59	0.64
09/mar/2016	0.76	0.49	0.53	0.46	0.34	0.31	0.35
19/mar/2016	0.75	0.44	0.47	0.43	0.34	0.33	0.35
03/abr/2016	0.70	0.48	0.52	0.46	0.32	0.30	0.32
04/may/2016	0.69	0.32	0.33	0.36	0.31	0.31	0.30
04/jun/2016	0.69	0.33	0.34	0.38	0.36	0.36	0.34
13/jun/2016	-	0.32	0.33	0.36	-	-	-
02/jul/2016	-	0.33	0.34	0.37	-	-	-
16/jul/2016	0.46	0.33	0.34	0.37	0.16	0.16	0.16
29/jul/2016	0.41	0.28	0.29	0.35	0.15	0.15	0.14
06/ago/2016	0.33	0.29	0.30	0.35	0.12	0.12	0.11
25/ago/2016	0.24	0.31	0.31	0.36	0.11	0.11	0.10
04/sep/2016	0.20	0.32	0.33	0.37	0.10	0.10	0.09

**Anexo F.** Valores del coeficiente de transpiración durante la etapa de máximo desarrollo de la vegetación ( $K_{cb}$  full), el valor máximo del coeficiente de vegetación ( $K_c$  max) y el coeficiente de reducción de la evaporación ( $K_r$ ) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la estación Eddy Covarianza (EEC) para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye.

Facha		LHC			EEC	
recha	Kcb full	K <sub>c max</sub>	Kr	K <sub>cb</sub> full	K <sub>c max</sub>	Kr
03/jun/2015	1.13	1.18	0.22	1.17	1.18	-
18/jun/2015	1.21	1.26	0.28	1.24	1.26	-
13/jul/2015	1.12	1.17	0.25	1.16	1.17	-
06/sep/2015	1.17	1.22	0.22	1.21	1.22	-
24/oct/2015	1.21	1.26	0.22	1.25	1.26	-
17/nov/2015	1.19	1.24	0.23	1.23	1.24	0.13
08/dic/2015	1.20	1.25	0.23	1.24	1.25	0.14
14/ene/2016	1.05	1.10	1.33	1.08	1.10	1.27
06/feb/2016	1.18	1.23	1.29	1.21	1.23	1.22
17/feb/2016	1.17	1.22	1.12	1.21	1.22	0.84
09/mar/2016	1.11	1.16	1.05	1.14	1.16	0.50

Facha		LHC			EEC	
геспа	K <sub>cb full</sub>	K <sub>c max</sub>	Kr	K <sub>cb full</sub>	K <sub>c max</sub>	Kr
19/mar/2016	1.10	1.15	0.89	1.14	1.15	0.48
03/abr/2016	1.20	1.25	0.57	1.24	1.25	0.41
04/may/2016	1.08	1.13	0.39	1.11	1.13	0.39
04/jun/2016	1.21	1.26	0.39	1.25	1.26	0.39
13/jun/2016	1.10	1.15	0.37	1.14	1.15	-
02/jul/2016	1.11	1.16	0.35	1.14	1.16	-
16/jul/2016	1.16	1.21	0.33	1.20	1.21	0.19
29/jul/2016	1.14	1.19	0.30	1.18	1.19	0.16
06/ago/2016	1.11	1.16	0.29	1.15	1.16	0.14
25/ago/2016	1.16	1.21	0.26	1.19	1.21	0.12
04/sep/2016	1.13	1.18	0.25	1.16	1.18	0.11

Anexo G. Valores del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la EEC para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye. K<sub>c-R</sub>, K<sub>c-G</sub> y K<sub>c-C-M</sub> es el coeficiente de vegetación calculado a partir del índice de área foliar propuesto por Rodríguez-Moreno y Bullock (2013), Galvincio et al. (2013) y Clemente-Machado (2014) respectivamente.

Facha		LHC			EEC	
геспа	K <sub>c-R</sub>	K <sub>c-G</sub>	K <sub>c-C-M</sub>	K <sub>c-R</sub>	K <sub>c-G</sub>	K <sub>c-C-M</sub>
03/jun/2015	0.10	0.10	0.11	-	-	-
18/jun/2015	0.25	0.25	0.28	-	-	-
13/jul/2015	0.18	0.18	0.20	-	-	-
06/sep/2015	0.09	0.09	0.11	-	-	-
24/oct/2015	0.08	0.08	0.10	-	-	-
17/nov/2015	0.13	0.14	0.14	0.12	0.12	0.14
08/dic/2015	0.12	0.12	0.14	0.12	0.12	0.15
14/ene/2016	1.31	1.30	1.32	-	-	-
06/feb/2016	1.40	1.38	1.41	1.36	1.36	1.37
17/feb/2016	1.24	1.23	1.24	0.98	0.99	0.98
09/mar/2016	1.11	1.11	1.11	0.62	0.64	0.61
19/mar/2016	0.97	0.97	0.96	0.58	0.60	0.58
03/abr/2016	0.69	0.70	0.68	0.56	0.58	0.55
04/may/2016	0.40	0.41	0.41	0.44	0.44	0.45
04/jun/2016	0.42	0.43	0.45	0.48	0.48	0.50
13/jun/2016	0.36	0.37	0.38	-	-	-
02/jul/2016	0.34	0.34	0.35	-	-	-
16/jul/2016	0.30	0.30	0.33	0.23	0.23	0.24
29/jul/2016	0.29	0.29	0.30	0.18	0.18	0.20
06/ago/2016	0.24	0.25	0.26	0.14	0.14	0.15
25/ago/2016	0.21	0.21	0.23	0.10	0.10	0.11
04/sep/2016	0.18	0.19	0.20	0.08	0.09	0.09

**Anexo H.** Valores del coeficiente de vegetación (K<sub>c</sub>) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC) y en la estación Eddy Covarianza (EEC) para las imágenes satelitales disponibles en RapidEye omitiendo el coeficiente de evaporación de agua en el suelo (K<sub>e</sub>). K<sub>c-R</sub>, K<sub>c-G</sub> y K<sub>c-C-M</sub> es el coeficiente de vegetación calculado a partir del índice de área foliar propuesto por Rodríguez-Moreno y Bullock (2013), Galvincio et al. (2013) y Clemente-Machado (2014) respectivamente.

Fecha		LHC		EEC		
	Kc-R	Kc-G	Kc-C-M	Kc-R	Kc-G	Кс-С-М
03/jun/2015	0.06	0.06	0.07	-	-	-

Eacha		LHC			EEC	
геспа	K <sub>c-R</sub>	Kc-G	K <sub>c-C-M</sub>	K <sub>c-R</sub>	Kc-G	K <sub>c-C-M</sub>
18/jun/2015	0.12	0.12	0.16	-	-	-
13/jul/2015	0.09	0.09	0.12	-	-	-
06/sep/2015	0.05	0.05	0.07	-	-	-
24/oct/2015	0.05	0.05	0.06	-	-	-
17/nov/2015	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.10
08/dic/2015	0.07	0.07	0.09	0.07	0.08	0.11
14/ene/2016	0.42	0.46	0.41	-	-	-
06/feb/2016	0.55	0.60	0.51	0.43	0.46	0.42
17/feb/2016	0.56	0.61	0.52	0.42	0.46	0.41
09/mar/2016	0.57	0.60	0.53	0.37	0.40	0.35
19/mar/2016	0.49	0.53	0.46	0.33	0.35	0.32
03/abr/2016	0.36	0.39	0.35	0.34	0.37	0.32
04/may/2016	0.21	0.22	0.23	0.22	0.23	0.25
04/jun/2016	0.19	0.20	0.23	0.23	0.23	0.26
13/jun/2016	0.18	0.18	0.21	-	-	-
02/jul/2016	0.17	0.18	0.20	-	-	-
16/jul/2016	0.14	0.14	0.18	0.15	0.16	0.17
29/jul/2016	0.16	0.16	0.18	0.11	0.12	0.14
06/ago/2016	0.13	0.13	0.16	0.10	0.10	0.12
25/ago/2016	0.11	0.11	0.14	0.07	0.08	0.09
04/sep/2016	0.10	0.11	0.12	0.06	0.07	0.07

**Anexo I.** Evapotranspiración actual calculada ( $ET_{a cal}$ ) utilizando las aproximaciones del coeficiente de vegetación ( $K_c$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_{o med}$ ) en el laboratorio de hidrogeología de campo (LHC)y en la estación Eddy Covarianza (EEC).

<b>F</b> k. a		LHC			EEC	
Fecha	ET <sub>a cal-R</sub>	ET <sub>a cal-G</sub>	ET <sub>acal C-M</sub>	ET <sub>a cal-R</sub>	ET <sub>a cal-G</sub>	ET <sub>acal C-M</sub>
03/jun/2015	0.30	0.30	0.38	-	-	-
18/jun/2015	0.82	0.83	1.07	-	-	-
13/jul/2015	0.53	0.54	0.70	-	-	-
06/sep/2015	0.30	0.31	0.43	-	-	-
24/oct/2015	0.28	0.29	0.37	-	-	-
17/nov/2015	0.23	0.24	0.27	0.24	0.25	0.30
08/dic/2015	0.23	0.23	0.28	0.24	0.26	0.36
14/ene/2016	0.84	0.91	0.82	-	-	-
06/feb/2016	2.00	2.17	1.86	1.54	1.67	1.53
17/feb/2016	2.23	2.40	2.06	1.66	1.82	1.61
09/mar/2016	1.97	2.08	1.83	1.28	1.39	1.21
19/mar/2016	2.01	2.17	1.87	1.32	1.44	1.30
03/abr/2016	1.85	2.02	1.78	1.73	1.89	1.68
04/may/2016	0.77	0.81	0.83	0.80	0.83	0.90
04/jun/2016	1.38	1.42	1.64	1.63	1.68	1.88
13/jun/2016	0.97	1.00	1.13	-	-	-
02/jul/2016	0.97	1.00	1.12	-	-	-
16/jul/2016	0.84	0.85	1.10	0.92	0.95	1.04
29/jul/2016	1.02	1.05	1.16	0.74	0.76	0.92
06/ago/2016	0.63	0.64	0.78	0.48	0.49	0.57
25/ago/2016	0.56	0.57	0.68	0.37	0.38	0.43
04/sep/2016	0.44	0.45	0.54	0.28	0.28	0.31