

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN VIÑEDO DE UVA DE MESA (*Vitis vinífera*) CON IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2

ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION OF A VINEYARD OF TABLE GRAPES (*Vitis vinífera*) USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGERY

José Manuel **Salvador-Castillo**¹, Martín Alejandro **Bolaños-González**^{1*}, Julio César **Rodríguez**², Enrique **Palacios-Vélez**¹, Luis Alberto **Palacios-Sánchez**³, Christopher **Watts**², Carlos **Lizárraga-Celaya**², Samuel **Ortega-Farías**⁴, Salah **Er-Raki**⁵

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco 56230 México. (slcastillo990@gmail.com), (martinb72@gmail.com), (epalacio@colpos.mx). ²Universidad de Sonora. Boulevard Luis Encinas y Rosales SN, Centro. Hermosillo, Sonora. 83000 México. (jcrodr@guayacan.uson.mx). ³Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas, S.A. de C.V. El Sol 11. Colonia Alameda. Hermosillo, Sonora. 83204 México. (luispalacios@seissa.com.mx). ⁴Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca, Talca, Castilla 747, Chile (sortega@utulca.cl). ⁵LP-2M2E, Département de physique Appliquée, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Morocco (s.erraki@gmail.com).

RESUMEN

La uva de mesa (*Vitis vinífera*) es uno de los cultivos de mayor relevancia económica y social en Sonora, México. Debido a la precipitación escasa y la demanda evaporativa elevada de la zona, es un cultivo con un requerimiento alto de agua. Por ello su producción depende de la aplicación de riego y es importante estimar con precisión y de manera extensiva la evapotranspiración de este cultivo (ET_c) para mejorar la eficiencia del riego a corto plazo. Esta investigación se realizó durante 2018 y 2019 con el objetivo de desarrollar y evaluar un modelo entre el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) calculado con imágenes Sentinel-2, y el coeficiente de cultivo (K_c) determinado con el sistema de covarianza de vórtices (*Eddy Covariance*, EC) como opción para estimar la ET_c de un viñedo de uva de mesa en la Costa de Hermosillo, Sonora. Con los datos de NDVI y de K_c del año 2018 se construyó un modelo de regresión simple con inicio forzado al origen en las coordenadas nulas ($K_{cNDVI} = 0.9467 \text{ NDVI}$; $R^2 = 0.74$) como base para estimar la ET_c . Al validarlo con datos diarios del 2019 se obtuvo una R^2 de 0.76 y un CME de 0.11 al relacionar K_c vs. K_{cNDVI} , mientras que al relacionar ET_c vs. ET_c estimada se encontró una R^2 de 0.92 y un CME de 0.67 mm d⁻¹. Los resultados indicaron que la ET_c puede estimarse con precisión adecuada y de manera oportuna con el modelo propuesto. Sin embargo, se encontró que el modelo puede subestimar la ET_c durante la temporada de desarrollo

ABSTRACT

Table grapes (*Vitis vinífera*) are one of the crops of highest economic and social relevance in Sonora, Mexico. Due to the scant precipitation and high evaporative demand of the zone, it is a crop with a high water requirement. Therefore, its production depends on the application of irrigation, and it is important to have precise and extensive estimation of the crop evapotranspiration (ET_c) to improve efficiency of irrigation in the short term. This research was carried out during 2018 and 2019 with the objective of developing and evaluating a model between the normalized difference vegetation index (NDVI) calculated with Sentinel-2 images, and the crop coefficient (K_c) determined with a covariance turbulence flux system (*Eddy Covariance*, EC) as an option for estimating the ET_c of a vineyard of table grapes in Costa de Hermosillo, Sonora. Using NDVI and K_c data from 2018 records, a simple regression model was constructed with the start forced to the origin at the null coordinates ($K_{cNDVI} = 0.9467 \text{ NDVI}$; $R^2 = 0.74$) as a base for ET_c estimation. When the regression model was validated with daily 2019 data, an R^2 of 0.76 was obtained along with a CME of 0.11 by relating K_c vs. K_{cNDVI} . Whereas by relating ET_c vs. estimated ET_c , an R^2 of 0.92 was found, and a CME of 0.67 mm d⁻¹. The results indicated that the ET_c can be estimated with adequate precision and in an opportune manner with the proposed model. However, it was found that the model may underestimate ET_c during the period of maximum crop development due to NDVI saturation. However, in the winter when the values of NDVI depend on the soil structural characteristics and on the remains of winter pruning, ET_c tends to be overestimated.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8110-1051>.

Recibido: agosto, 2020. Aprobado: julio, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 55: 369-387. 2021.

máximo del cultivo debido a la saturación del NDVI. Mientras que en invierno cuando los valores de NDVI dependen de las características estructurales del suelo y de los restos de la poda invernal, la ET_c puede sobreestimarse.

Palabras claves: *Vitis vinifera*, índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), covarianza de vórtices (EC), coeficiente de cultivo (K_c).

INTRODUCCIÓN

En el municipio de Hermosillo, Sonora, la uva de mesa (*Vitis vinifera*) es el cultivo que proporciona el beneficio mayor por metro cúbico del agua de riego utilizada (\$13.00 MXN / 1.17 USD m^{-3}), requiere 12 000 m^3 de agua y 332 jornales por hectárea (Salazar *et al.*, 2012). Esta situación refleja la gran importancia económica del cultivo, pero utiliza un volumen de agua muy alto en una zona donde este recurso es escaso. Al respecto, Hernández (2019) mencionó que el volumen de agua concesionado a la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo, A.C. es de 433 $hm^3 a^{-1}$, cantidad superior en 250 hm^3 a la recarga natural anual. Por lo tanto, el abatimiento del acuífero continúa, y los fenómenos de intrusión salina y contaminación del suelo se estimulan. Dichos problemas se pueden evitar, o al menos disminuir sus efectos, por medio de la programación adecuada del riego (Zermeño-González *et al.*, 2017), para lo cual es esencial estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

La ET_c se obtiene al multiplicar la evapotranspiración de referencia (ET_0) por un coeficiente de cultivo (K_c). La FAO recomienda utilizar la ecuación de Penman-Monteith, reconocida como el método estándar para calcular ET_0 . El K_c depende del desarrollo de la cobertura foliar del cultivo durante las etapas de su crecimiento y es un factor importante para la planificación del riego en periodos mayores a un día (Allen *et al.*, 1998).

De forma experimental el cálculo de ET_c puede realizarse con lisímetros de pesada (López-Urrea *et al.*, 2012) o técnicas de covarianza de vórtices (Eddy Covariance, EC) (Rodríguez *et al.*, 2010), entre otros. Sin embargo, el primer método solo proporciona valores puntuales que por lo regular se extrapolan a nivel de parcela sin las bases necesarias para corroborar que el cultivo responde de forma adecuada. Mientras que el segundo sí permite obtener información de

Key words: *Vitis vinifera*, normalized difference vegetation index (NDVI), Eddy covariance (EC), crop coefficient (K_c).

INTRODUCTION

In the municipality of Hermosillo, Sonora, table grapes (*Vitis vinifera*) are the crop that provides the highest benefit per cubic meter of irrigation water used (\$13.00 MXN / 1.17 USD m^{-3}), requiring 12 000 m^3 of water and 332 daily wages per hectare (Salazar *et al.*, 2012). This situation displays the economic importance of this fruit-bearing tree, but it uses a very high volume of water in a zone where this resource is scarce. In this regard, Hernández (2019) indicated that water volumes concession to "Asociación de Usuarios del Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo, A.C." is 433 $hm^3 y^{-1}$, an amount higher than 250 hm^3 to the annual natural refill. Therefore, the depletion of the aquifer continues, and the phenomena of saline intrusion and soil contamination are stimulated. These problems are avoidable, or at least their effects can be diminished, by means of adequate irrigation (Zermeño-González *et al.*, 2017), therefore, it becomes key how to estimate the crop evapotranspiration (ET_c).

ET_c is obtained by multiplying the reference evapotranspiration (ET_0) by a crop coefficient (K_c). FAO recommends using the Penman-Monteith equation, recognized as the standard method for calculating ET_0 . K_c depends on the development of the foliar cover of the crop during the growth stages and is an important factor for the planification of irrigation in periods longer than one day (Allen *et al.*, 1998).

The calculation of ET_c can be performed experimentally with weighing lysimeters (López-Urrea *et al.*, 2012) or by covariance on turbulence flux systems (Eddy Covariance, EC) (Rodríguez *et al.*, 2010), among others. However, the first method only provides appointed values which usually are extrapolated at the plot scale without the bases necessary to confirm that the crop responds adequately. Whereas the latter makes it possible to obtain information in different sizes of study areas (footprint), which depends on the height at which instrumentation is located and on the velocity of the prevailing winds.

Satellite imagery makes it possible to monitor vegetation growth by means of empirical or

tamaños distintos de áreas de estudio (*foot print*), lo cual depende de la altura de la instrumentación y la velocidad de los vientos dominantes.

Las imágenes de satélite permiten dar seguimiento al crecimiento de la vegetación por medio de relaciones empíricas o teóricas que relacionan las variables biofísicas (con énfasis en cobertura vegetal, índice de área foliar y biomasa) con los índices de vegetación (IV) (Paz *et al.*, 2015; Pôças *et al.*, 2020). Consoli y Vanella (2014) señalaron que las herramientas de sensores remotos o teledetección para estimar ET_C se han desarrollado desde dos enfoques. El primero es el método de balance de energía de la superficie terrestre que utiliza los IV derivados de la reflectancia del dosel y la temperatura de la superficie medida con una banda de infrarrojo térmico, y el segundo relaciona de forma directa el K_C con los IV.

En la Costa de Hermosillo y la misma zona de estudio, Er-Raki *et al.* (2013) mostraron que con el segundo enfoque se obtienen resultados satisfactorios, pero se requiere la calibración a partir de modelos generados con experimentos de larga duración. El objetivo de esta investigación fue generar un modelo que con el NDVI obtenido de imágenes satelitales Sentinel-2 permitiera estimar el K_C y, en consecuencia, la ET_C de los viñedos de uva de mesa en la Costa de Hermosillo en dos ciclos de producción (2018 y 2019); así como validar el modelo generado con mediciones realizadas desde el enfoque de la covarianza de vórtices.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se realizó durante los años 2018 y 2019 en un viñedo de uva de mesa con una superficie de 106 ha, ubicado en la Costa de Hermosillo, Sonora, México (28° 54' 42.72" N; 111° 18' 32.42" O; altitud 100 m). El clima de la zona es árido, con una precipitación media anual de 188 mm, promedio de los últimos 50 años. La temporada de lluvias ocurre de julio a septiembre (70% del total anual) y rara vez se presentan lluvias en el periodo de marzo a junio (Rodríguez *et al.*, 2010; Er-Raki *et al.*, 2013). La temperatura media diaria oscila entre los 22 y los 24 °C, con máximas extremas de -7 y 49.5 °C en invierno y verano, respectivamente.

Cuatro variedades establecidas durante ocho años de plantación (Cuadro 1) se evaluaron en el área de estudio (Figura 1). En el predio la distancia entre líneas fue 3.8 m y entre plantas

theoretical relationships that relate the biophysical variables (mainly, vegetation cover, leaf area index and biomass) with the vegetation indices (IV) (Paz *et al.*, 2015; Pôças *et al.*, 2020). Consoli and Vanella (2014) indicated that remote sensing tools for estimating ET_C have been developed from two perspectives. In the first place, there is the method of energy balance on terrestrial surface that uses the IV derived from canopy reflectance and surface temperature measured on the thermal infrared band; whilst the second directly relates K_C with the IV.

In the Costa de Hermosillo and the same study location, Er-Raki *et al.* (2013) showed that with the second approach, satisfactory results are obtained, but it requires calibration by models generated from long duration experiments. The objective of this study was to generate a model which, based on the NDVI obtained from Sentinel-2 satellite imagery, would allow K_C estimation, and consequently ET_C for vineyards of table grapes in the Costa de Hermosillo along two production cycles (2018 and 2019); as well as to validate the model generated with measurements recorded by Eddy covariance.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was carried out during 2018 and 2019 in a vineyard of table grapes with an area of 106 ha, located in the Costa de Hermosillo, Sonora, Mexico (28° 54' 42.72" N; 111° 18' 32.42" W; altitude 100 m). The climate of the zone is arid, with a mean annual rainfall of 188 mm, average of the last 50 years. The rainy season occurs from July to September (70% of the annual total) and on rare occasions there are rains in the period from March to June (Rodríguez *et al.*, 2010; Er-Raki *et al.*, 2013). The mean daily temperature fluctuates between 22 to 24 °C, with maximum extremes of -7 and 49.5 °C in winter and summer, respectively.

Four varieties established during eight years of planting (Table 1) were evaluated in the area of study (Figure 1). In the plot the distance between rows was 3.8 m and among plants the distance varied from 1.0 to 1.6 m, with vines guided along a trellis set. A drip irrigation system was used, with drippers separated at 0.5 m, with a maximum water runoff of 2.5 L h⁻¹ and 92% uniformity coefficient.

Processing satellite imagery

For this study 48 Sentinel-2 satellite images were obtained in 2018 and 43 images in 2019, retrieved under free-access license,

Cuadro 1. Año de plantación, cultivar de vid establecido y parcelas plantadas.
Table 1. Year of plantation, established grape cultivar, and planted plots.

Año	Cultivar	Parcelas	Plantas ha ⁻¹
1999	Flame	A1, A2, B1, B2	1644
2001	Perlette	A4, B4	1644
2005	Flame	A5, A6, B5 y B6	1644
2010	Summer Royal	C4	1644
2012	Perlette	A3 y B3	2193
2013	Flame	C2 [†] , C3 [†] , C5 y C6	2193
2015	Sugraone	D6, D7 y D8	2193
2016	Sugraone	C7 y C8	2193

[†]Los cuadros de plantación C2 y C3 tienen una superficie de 3 ha y los demás 4 ha.

♦The C2 and C3 plantation squares have an area of 3 ha, and the remaining, 4 ha.

varío de 1.0 a 1.6 m, con guías conducidas por el sistema de pér-golas. El sistema de riego fue por goteo, con emisores separados 0.5 m, con gasto máximo de 2.5 L h⁻¹ y 92% de coeficiente de uniformidad.

Procesamiento de imágenes satelitales

Para el estudio se obtuvieron 48 imágenes satelitales Sentinel-2 en 2018 y 43 imágenes en 2019 de acceso libre, propiedad

property of the European Space Agency. They were downloaded from the website of the United States Geological Survey (USGS), <https://earthexplorer.usgs.gov/> in jp2 format with 1C processing level, which does not include atmospheric correction. Afterwards, the atmospheric correction was operated in QGIS v. 3.8.2, which use the dark objects subtraction technique (Chavez, 1996). Then, in order to extract polygons of interest and calculating the NDVI of each image, two programming scripts were developed in Python[®] v. 3.8.

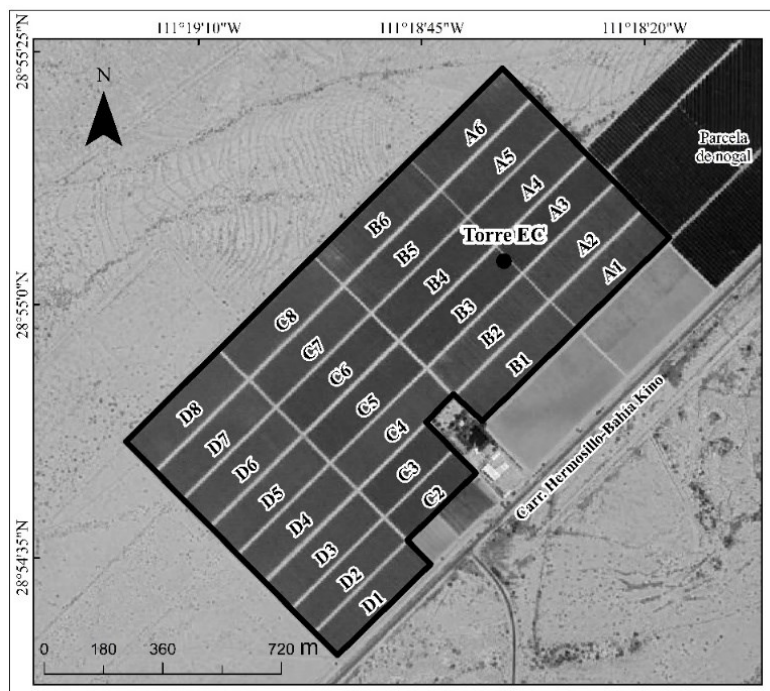


Figura 1. Delimitación del sitio experimental, identificación de las parcelas y ubicación de la torre de EC.
Figure 1. Delimitation of the experimental site, plots identification and location of the EC tower.

de la Agencia Espacial Europea. Éstas se descargaron de la plataforma <https://earthexplorer.usgs.gov/> del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS) en formato jp2 con nivel de procesamiento 1C, el cual no incluye la corrección atmosférica. Después se realizó la corrección atmosférica en QGIS v. 3.8.2 que utiliza la técnica de sustracción de objetos oscuros (Chavez, 1996). Luego, para extraer los polígonos de interés y calcular el NDVI de cada imagen se desarrollaron dos protocolos de códigos de programación en Python® v. 3.8.

El NDVI (Rouse *et al.*, 1974) se calculó con la ecuación 1.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

donde, NDVI es el índice de vegetación de diferencias normalizadas (adimensional); NIR (o reflectancia infrarroja cercana) es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (%); y R es la reflectancia en la banda del rojo (%). De acuerdo con las bandas de información que contienen las imágenes Sentinel-2, B8 corresponde a la banda NIR y B4 a la banda R, ambas con una resolución espacial de 10 m. En la zona de estudio el viento dominante fue de dirección suroeste, así que la cantidad mayor de datos recolectados en la torre de EC provino de la parcela B3. Por esta razón, para correlacionar un valor diario de NDVI con un valor diario de K_c medido con el método de EC, así como para generar y validar el modelo para estimar el K_c fue necesario obtener los valores diarios de NDVI de la parcela B3 durante 2018 y 2019 por medio de una interpolación lineal.

Datos micrometeorológicos

Para obtener el K_c diario, se recopiló información de variables meteorológicas diferentes con las cuales se estimó la ET_0 y la ET_c . Las variables meteorológicas se obtuvieron con una torre instrumentada de 6.0 m de altura, situada a 400 m dentro del campo de cultivo en la dirección del viento dominante (suroeste), para tener las condiciones de recuperación de datos de movimiento bidireccional de viento (*fetch*) requeridas por el enfoque EC. Tales condiciones se han establecido en una relación 100:1; es decir, 100 m de distancia horizontal (superficie homogénea) para los flujos por cada 1 m de altura a la cual se colocaron los instrumentos para medir las variables turbulentas (Allen *et al.*, 2011).

Las variables medidas fueron: radiación neta (R_n , $W\ m^{-2}$) con un radiómetro neto (CNR4, Kipp and Zonen, Inc., Delft, Holanda) colocado a 5.2 m de altura; flujo de calor sensible (H , $W\ m^{-2}$) con un anemómetro sónico (Gill Instruments Limited, Lymington, Hampshire, EE. UU.); flujo de calor latente (LE

The NDVI (Rouse *et al.*, 1974) was calculated with equation 1.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

where NDVI is the vegetation index of normalized differences (dimensionless); NIR (near infrared reflectance) is the reflectance in the near infrared band (%); and R is the reflectance in the red band (%). According to the bands of information contained in the Sentinel-2 images, B8 corresponds to the NIR band and B4 to the R band, both with a spatial resolution of 10 m. In the study zone the prevailing wind was from the southwest, thus most of the data recorded in the EC tower came from the B3 plot. Therefore, to correlate a daily NDVI value with a daily K_c value measured by the EC method, as well as to generate and validate the model for estimating the K_c , it was necessary to obtain daily values of NDVI from the B3 plot during 2018 and 2019 by means of a linear interpolation.

Micrometeorological data

To obtain the daily K_c , information was gathered on different meteorological variables which were used to estimate the ET_0 and ET_c . Weather data was obtained with an instrumented tower of 6.0 m height, placed 400 m within the cultivation plot in the direction of the prevailing wind (southwest), to have the conditions to collect data from directional, and turbulent movement (*fetch*) required by the EC approach. These conditions have been established in a ratio 100:1; that is, 100 m of horizontal distance (homogeneous surface) for the flows for each 1 m of height at which the instruments were placed for measuring the turbulent variables (Allen *et al.*, 2011).

The variables measured were as follows. Net radiation (R_n , $W\ m^{-2}$) with a net radiometer (CNR4, Kipp and Zonen, Inc., Delft, Holland) placed at 5.2 m height. Sensitive heat flow (H , $W\ m^{-2}$) with a sonic anemometer (Gill Instruments Limited, Lymington, Hampshire, U.K.). Latent heat flow ($LE\ W\ m^{-2}$) with IRGA 7500RS (LI-COR, Lincoln, Nebraska, U.S.) and sonic anemometer (Gill Instruments Limited). Velocity ($m\ s^{-1}$) and wind direction (degrees) with an anemometer 5103 (Young, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, U.S.), for all those, the three instruments were placed at 6 m height. Rainfall (mm) with a pluviometer (Texas Electronics Inc., Dallas, Texas, U.S.) placed at 4 m height. Temperature ($^{\circ}C$) and humidity of the air (%) with an HMP 60 (Vaisala Inc., Woburn, MA, U.S.) placed at 0.2 m height. And irrigation rate with a pluviometer (Texas Electronics Inc. Dallas, Texas, U.S.) installed at 0.40 m below the irrigation line and under a dripper to count the irrigation rate and its duration.

W m⁻²) con un IRGA 7500RS (LI-COR, Lincoln, Nebraska, EE.UU.) y anemómetro sónico (Gill Instruments Limited); velocidad (m s⁻¹) y dirección del viento (grados) con un anemómetro 5103 (Young, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, EE.UU.), los tres instrumentos colocados a 6 m de altura; precipitación (mm) con un pluviómetro (Texas Electronics Inc. Dallas, Texas, EE. UU.) colocado a 4 m de altura; temperatura (°C) y humedad del aire (%) con un HMP 60 (Vaisala, Inc., Woburn, MA, EE.UU.) colocado a 2.5 m de altura; y la lámina de riego (mm) con un pluviómetro (Texas Electronics Inc. Dallas, Texas, EE. UU.) colocado a 0.4 m debajo de la línea de riego y debajo de un gotero para medir la lámina de riego y su duración.

Las variables turbulentas (velocidad vertical del viento y vapor de agua) se midieron a una frecuencia de 20 Hz. Los datos generados se almacenaron con el sistema GHG de LI-COR (Lincoln, Nebraska USA), para después crear archivos en formato ghg con el promedio de dichas variables cada 30 min. De acuerdo con Van Kesteren *et al.* (2013) es un tiempo apropiado para manejar de forma estadística las variables turbulentas. Por otro lado, las variables meteorológicas se midieron en un intervalo de 10 s y se guardaron como promedio cada 10 min. La información de las variables turbulentas se procesó con el programa EddyPro (Burba, 2013). Después, para calcular la evapotranspiración y el flujo de calor sensible, se efectuó un postproceso de la información recopilada con el fin de corregir errores o datos faltantes (The Max Planck Institute for Biogeochemistry, 2020). Los resultados finales se organizaron por día y por semana en hojas Excel®.

Evapotranspiración de referencia (ET₀), evapotranspiración del cultivo (ET_c) y coeficiente de cultivo (K_c)

La ET₀ se calculó por el método Penman-Monteith FAO56 (Allen *et al.*, 1998) con la ecuación 2:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

donde, ET₀ es la evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹), R_n es la radiación neta (MJ m⁻² d⁻¹), G es el flujo de calor del suelo (MJ m⁻² d⁻¹), T es la temperatura promedio diaria del aire (°C), Δ es la pendiente de la curva de presión a saturación a la temperatura T (kPa °C⁻¹), γ es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), e_s es la presión de saturación del vapor a temperatura T (kPa), e_a es la presión de vapor promedio diario (kPa), y u₂ es la velocidad promedio diaria del viento a 2 m de elevación sobre el terreno (m s⁻¹). Debido a que la velocidad del viento se midió a 6 m de altura, se aplicó la ecuación 47 del manual de Allen *et al.* (1998) para obtener la velocidad del viento a 2 m de altura.

The turbulent variables (vertical wind velocity and water vapor) were measured at a frequency of 20 Hz. The data generated were stored with the system GHG of LI-COR (Lincoln, Nebraska, U.S.), to later create ghg files with the average of these variables every 30 min. According to Van Kesteren *et al.* (2013), this is an appropriate time for statistically managing the turbulent variables. On the other hand, the meteorological variables were measured at an interval of 10 s and were saved at an average of every 10 min. The information of the turbulent variables was processed with the software EddyPro (Burba, 2013). Afterwards, to calculate evapotranspiration and the sensitive heat flux, a postprocess was performed of the information gathered in order to correct errors or missing data (The Max Planck Institute for Biogeochemistry, 2020). The complete results were organized by day and by week in ExcelTM sheets.

Reference evapotranspiration (ET₀), crop evapotranspiration (ET_c) and crop coefficient (K_c)

The ET₀ was calculated by the method of Penman-Monteith FAO56 (Allen *et al.*, 1998) with equation 2:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

where ET₀ is the reference evapotranspiration (mm d⁻¹), R_n is net radiation (MJ m⁻² d⁻¹), T is the daily average temperature of the air (°C), Δ is the slope of the curve of saturation pressure of the vapor at temperature T (kPa °C⁻¹), γ psychrometric constant (kPa °C⁻¹), e_s is the saturation pressure of the vapor at temperature T (kPa), e_a is the average daily vapor pressure (kPa), and u₂ is the daily average wind velocity at 2 m elevation over the ground (m s⁻¹). Because the wind velocity was measured at 6 m height, equation 47 of the manual of Allen *et al.* (1998) was applied to obtain the wind velocity at 2 m height.

To estimate the ET_c, the EC method was used. For this purpose, the latent heat flux (LE) was obtained along with the sensitive heat flux (H) and equations 3 and 4 (Ham and Heilman, 2003).

$$LE = L \times (\overline{w' \rho_{vv}^{-1}}) \quad (3)$$

$$H = \rho_a \times C_p \times (\overline{w' T_s'}) - 0.51 \times T_a \times \frac{\rho_a \times C_p}{L} \times LE \quad (4)$$

Para estimar la ET_C se utilizó el método de EC. Para ello se obtuvo el flujo de calor latente (LE) y flujo de calor sensible (H) con las ecuaciones 3 y 4 (Ham y Heilman, 2003).

$$LE = L \times (\overline{w' \rho_{wv}'}) \quad (3)$$

$$H = \rho_a \times C_p \times (\overline{w' T_s'}) - 0.51 \times T_a \times \frac{\rho_a \times C_p}{L} \times LE \quad (4)$$

donde, LE es el flujo de calor latente ($W m^{-2}$), H es el flujo de calor sensible ($W m^{-2}$), L es el calor latente de vaporización del agua ($J kg^{-1}$), w es la variación instantánea de la velocidad vertical del viento ($m s^{-1}$), ρ_{wv} es la densidad del vapor de agua en el aire ($kg m^{-3}$), ρ_a , C_p y T_a son la densidad ($kg m^{-3}$), capacidad calorífica ($1013 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$) y temperatura ($^\circ C$) del aire húmedo, respectivamente; y T_s es la temperatura sónica ($^\circ C$). El símbolo de prima significa desviaciones de la variable con respecto a la media y la barra horizontal sobre dos variables indica la covarianza entre las variables para un determinado segmento de tiempo (30 min en este caso).

El coeficiente de cultivo (K_C), obtenido cada día se determinó con la ecuación 5 (Doorenbos y Pruitt, 1977):

$$K_C = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (5)$$

donde, ET_C es la evapotranspiración del cultivo (ET_C medida por el método de EC, $mm d^{-1}$), y ET_0 es la evapotranspiración de referencia ($mm d^{-1}$).

Además, se aplicó la ecuación 6 para estimar la ET_C del periodo marzo-junio, del año 2019, y anual:

$$ET_{CEST} = \sum_{d=1}^n ET_0 * K_{CNDVI} \quad (6)$$

donde, ET_{CEST} es la evapotranspiración estimada del cultivo (mm), ET_0 es la evapotranspiración de referencia diaria ($mm d^{-1}$), y K_{CNDVI} es el K_C derivado del modelo obtenido (Figura 3).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó para construir un modelo de regresión simple con inicio forzado al origen en las coordenadas nulas y se usaron dos parámetros de eficiencia estadística. El

where LE is the latent heat flux ($W m^{-2}$), H is the sensitive heat flux ($W m^{-2}$), L is the latent heat vaporization of the water ($J kg^{-1}$), w is the instant variation of the vertical wind velocity ($m s^{-1}$), ρ_{wv} is the density of the water vapor in the air ($kg m^{-3}$), ρ_a , C_p and T_a are the density ($kg m^{-3}$), calorific capacity ($1013 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$) and temperature ($^\circ C$) of humid air, respectively; and T_s is the sonic temperature ($^\circ C$). The prime symbol signifies deviations of the variable in relation to the mean, and the horizontal bar over two variables indicates the covariance among those variables for a determined segment of time (30 min, in this case).

The crop coefficient (K_C), obtained each day was determined with equation 5 (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$K_C = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (5)$$

where ET_C is the crop evapotranspiration (ET_C measured by the method of EC, $mm d^{-1}$), and ET_0 is the reference evapotranspiration ($mm d^{-1}$).

Furthermore, equation 6 was applied to estimate the ET_C from March-June; the one through 2019, and annual:

$$ET_{CEST} = \sum_{d=1}^n ET_0 * K_{CNDVI} \quad (6)$$

where ET_{CEST} is the estimated crop evapotranspiration (mm). ET_0 is the reference daily evapotranspiration ($mm d^{-1}$), and K_{CNDVI} is the K_C derived from the obtained model (Figure 3).

Statistical analysis

The statistical analysis was done to construct a simple regression model with the start forced to the origin at the null coordinates and two statistical efficiency parameters were used. The determination coefficient (R^2), which indicates the capacity of a model to replicate its results (equation 7), and the mean square error (CME) which measures the variation of the calculated values regarding those observed (equation 8).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - \overline{y_{iobs}})(y_{imod} - \overline{y_{imod}})}{(\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - \overline{y_{iobs}})^2)^{\frac{1}{2}} (\sum_{i=1}^n (y_{imod} - \overline{y_{imod}})^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (7)$$

$$CME = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{imod} - y_{iobs})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

coeficiente de determinación (R^2), el cual indica la capacidad de un modelo para replicar sus resultados (ecuación 7), y el cuadrado medio del error (CME) que mide la variación de los valores calculados respecto a los observados (ecuación 8).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - \overline{y_{iobs}})(y_{imod} - \overline{y_{imod}})}{(\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - \overline{y_{iobs}})^2)^{\frac{1}{2}} (\sum_{i=1}^n (y_{imod} - \overline{y_{imod}})^2)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \quad (7)$$

$$CME = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{imod} - y_{iobs})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

donde, y_{iobs} = datos de K_c o ET_c estimados con la torre de EC, $\overline{y_{iobs}}$ = promedio de los datos de K_c o ET_c estimados con la torre de EC, y_{imod} = datos de K_c o ET_c estimados con el modelo generado y, $\overline{y_{imod}}$ = promedio de los datos de K_c o ET_c estimados con el modelo generado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Generación del modelo

La variación diaria del K_c y del NDVI registrada durante el 2018 (Figura 2) mostró que el NDVI creció desde la aparición de los brotes a partir del día juliano (Dj) 37, hasta la fecha de alcance de la cobertura total (Dj 121). En los Dj 201 y 240 se realizaron

where y_{iobs} = data of K_c or ET_c estimated with the tower of EC, $\overline{y_{iobs}}$ = average of the data of K_c or ET_c , y_{imod} = data of K_c or ET_c estimated with the generated model, and $\overline{y_{imod}}$ = average of the data of K_c or ET_c estimated with the generated model.

RESULTS AND DISCUSSION

Generation of the model

The daily variation of the K_c and of the NDVI recorded during 2018 (Figure 2) showed that the NDVI increased from the appearance of the shoots starting on Julian day (Dj) 37, until they reached total cover (Dj 121). On Dj 201 and 240, pruning was made, which caused a reduction of the NDVI. Regarding this, Er-Raki *et al.* (2013) and Campos *et al.* (2010) observed the same phenomenon. After Dj 263 senescence and leaves falling began. However, due to the appearance of new shoots, NDVI remained relatively stable until Dj 320. Finally, on Dj 359 the winter pruning was made. In this research the highest values of NDVI were found on Dj 175 (0.83) and Dj 130 (0.82), those data were obtained when the leaf area index (LAI) was 3.12 and 3.45 in 2018 and 2019, respectively. The lowest NDVI in 2018 occurred on Dj 40 (0.23), and in 2019 on Dj 25 (0.16), when the LAI was zero.

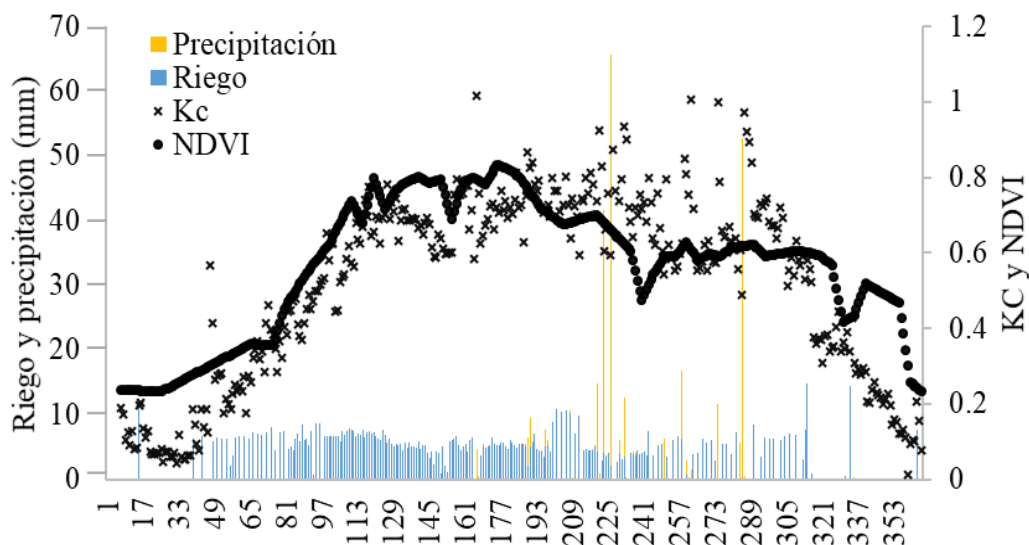


Figura 2. Riegos aplicados, precipitación y variación diaria del K_c y del NDVI durante el año 2018 en la parcela B3 plantada con uva de mesa cv. Perlette desde el año 2012.

Figure 2. Applied irrigations, rainfall and daily variation of K_c and NDVI during 2018 in the B3 plot planted with table grapes cv. Perlette since 2012.

podas; lo cual provocó una disminución del NDVI. Al respecto, Er-Raki *et al.* (2013) y Campos *et al.* (2010) observaron el mismo fenómeno. Después del Dj 263 se inició la senescencia y caída de hojas; sin embargo, debido a la aparición de brotes nuevos, el NDVI permaneció relativamente estable hasta el Dj 320. Por último, en el Dj 359 se realizó la poda de invierno. En esta investigación los valores más altos de NDVI se encontraron en los Dj 175 (0.83) y 130 (0.82), dicha información se obtuvo cuando el índice de área foliar (IAF) fue de 3.12 y 3.45 en 2018 y 2019, respectivamente. Mientras que el NDVI más bajo en 2018 se presentó en el Dj 40 (0.23) y en 2019 en el Dj 25 (0.16), cuando el IAF fue de cero.

Además, se aprecia que hacia el fin de año el NDVI disminuyó, pero esa disminución fue menor que la del K_c (Figura 2). Esto se explica porque la temperatura promedio mensual de noviembre y diciembre fue 18.5 y 14.8 °C, respectivamente. Bajo esas condiciones de temperatura no fue posible que la planta perdiera las hojas de forma natural y fue necesario aplicar un defoliante para que el cultivo entrara en latencia. Sin embargo, pese a que las plantas tienen hojas, la mayoría se encontraba en una etapa de senescencia avanzada y, por lo tanto, ya no eran tan eficientes para realizar el proceso de fotosíntesis. Prueba de ello es que el K_c siguió disminuyendo después del Dj 330, fecha en la cual se aplicó una lámina de riego de 14.5 mm que provocó un reverdecimiento leve del follaje, reflejado en el incremento del NDVI; en el estudio de Er-Raki *et al.* (2013) también se observó ese fenómeno. Asimismo, de acuerdo con Jiang *et al.*, (2006) en esta temporada el NDVI se puede sobreestimar debido al incremento de la sombra en el dosel de las plantas por un ángulo de inclinación mayor en la incidencia de la radiación solar directa.

Los valores diarios de K_c tuvieron una tendencia similar al NDVI, pero se observó que la lluvia aumentó sus valores debido a la mayor evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998; López-Urrea *et al.*, 2012). Al respecto, Rodríguez *et al.* (2010) señalaron que después de algunos días los valores vuelven a ser similares a los días previos al evento de precipitación. Por esta condición, para generar y validar el modelo no se usaron valores de K_c ni de NDVI interpolado, un día antes y dos días después de la lluvia. Según Cuesta *et al.* (2005), este procedimiento se basa en la relación de tipo lineal que existe entre el NDVI y el coeficien-

Furthermore, it was observed that towards the end of the year the NDVI decreased, but this reduction was less than that of the K_c (Figure 2). The plausible explanation is, that the average monthly temperature in November and December was 18.5 and 14.8 °C, respectively. Under these temperature conditions it was not possible for the plant to lose its leaves naturally, and it was necessary to apply a defoliant for the vines entered into latency. However, although the plants have leaves, most of them were in a state of advanced senescence, and therefore, they were no longer as efficient for the photosynthesis process. The proof of this was that the K_c continued in reduction after Dj 330, date at which an irrigation of 14.5 mm was supplied, which caused a slight greening of the foliage, expressed in the increment of the NDVI. Er-Raki *et al.* (2013) also observed this phenomenon. In addition, according to Jiang *et al.* (2006), in this period the NDVI may be overestimated due to the increase in shade on plant canopy produced by a greater inclination in the incidence degree of direct solar radiation.

The daily values of K_c had a tendency similar to that of NDVI, but it was observed that the rain increased its values due to the higher evaporation of the soil (Allen *et al.*, 1998, López-Urrea *et al.*, 2012). In this regard, Rodríguez *et al.* (2010) indicated that after several days the values are again similar to the days prior to the rainfall event. Because of this condition, to generate and validate the model, K_c values were not used nor interpolated NDVI, one day before or two days after the rainfall. According to Cuesta *et al.* (2005), this procedure is based on the linear relationship that exists between the NDVI and the basal crop coefficient (K_{cb}). The model was generated with the data of K_c and NDVI of the year 2018 and was validated with data of the year 2019.

Cuesta *et al.* (2005) and Consoli and Barbagallo (2012) found a linear relationship between K_c and NDVI. Therefore, with the NDVI and K_c values not influenced by the rainfall, a simple linear regression was obtained with the start forced to the origin at the null coordinates (Figure 3). Thus, the model to obtain K_c as a function of NDVI was generated. K_c obtained with the model was defined as K_{cNDVI} ($K_{cNDVI} = 0.8853(NDVI)$) while that obtained with equation 6, based on measurements from the EC system was labelled as K_c .

te basal del cultivo (K_{Cb}). El modelo se generó con los datos de K_C y NDVI del año 2018 y se validó con datos del año 2019.

Cuesta *et al.* (2005) y Consoli y Barbagallo (2012) encontraron que la relación entre el K_C y el NDVI es de tipo lineal. Por ello, con los valores de NDVI y de K_C no influenciados por la lluvia se obtuvo una regresión lineal simple con inicio forzado al origen en las coordenadas nulas (Figura 3). Así, se generó el modelo para obtener el K_C en función del NDVI. El K_C obtenido con el modelo se definió como K_{CNDVI} ($K_{CNDVI} = 0.8853(NDVI)$) y el obtenido con la ecuación 6, con base en los registros del sistema EC, fue K_C .

El $R^2 = 0.738$ encontrado en este estudio fue menor al $R^2 = 0.96$ calculado por Campos *et al.* (2010) y mayor al $R^2 = 0.63$ obtenido por Er-Raki *et al.* (2013). Tales diferencias es probable que se deban a las condiciones en las cuales se realizaron dichos estudios. En el caso de Campos *et al.* (2010) solo se relacionaron 9 datos de K_{Cb} con 9 datos de NDVI calculados a partir de imágenes Landsat 5 obtenidas en el periodo de desarrollo máximo del cultivo, comprendido entre los Dj 126 a 270. El ajuste menor obtenido por Er-Raki *et al.* (2013) se puede atribuir a las mediciones de reflectancia para calcular el NDVI, ya que las realizaron a una altura aproximada de 3 m sobre la superficie de suelo. Debido a que la vid es un

The $R^2 = 0.738$ found in this study was lower than the $R^2 = 0.96$ calculated by Campos *et al.* (2010) and higher than the $R^2 = 0.63$ obtained by Er-Raki *et al.* (2013). These differences are probably due to the conditions under which the studies were made. In the case of Campos *et al.* (2010), only 9 K_{Cb} data with 9 NDVI data calculated from Landsat 5 images obtained in the period of maximum development of the crop (Dj 126 to 270). The lowest fit obtained by Er-Raki *et al.* (2013) can be attributed to the measurements of reflectance for calculating NDVI, given that they were made at an approximate height of 3 m over ground surface. Because the vine is a tall crop (around 2.25 m), the measurement area of the manual radiometer was limited over the crop canopy. Therefore, those differences in the R^2 values may be results of a difference in scale.

Validation of the model

For the validation, the model generated (Figure 3) was applied with the data of NDVI of the year 2019. The relationship obtained between the values of K_{CNDVI} and of K_C showed an $R^2=0.749$, a CME = 0.11 and a slope (0.8853) close to 1.0 (Figure 4). The K_{CNDVI} , obtained with the NDVI data interpolated from the year 2019, was multiplied by the ET_0 of the corresponding day to estimate the ET_C of the

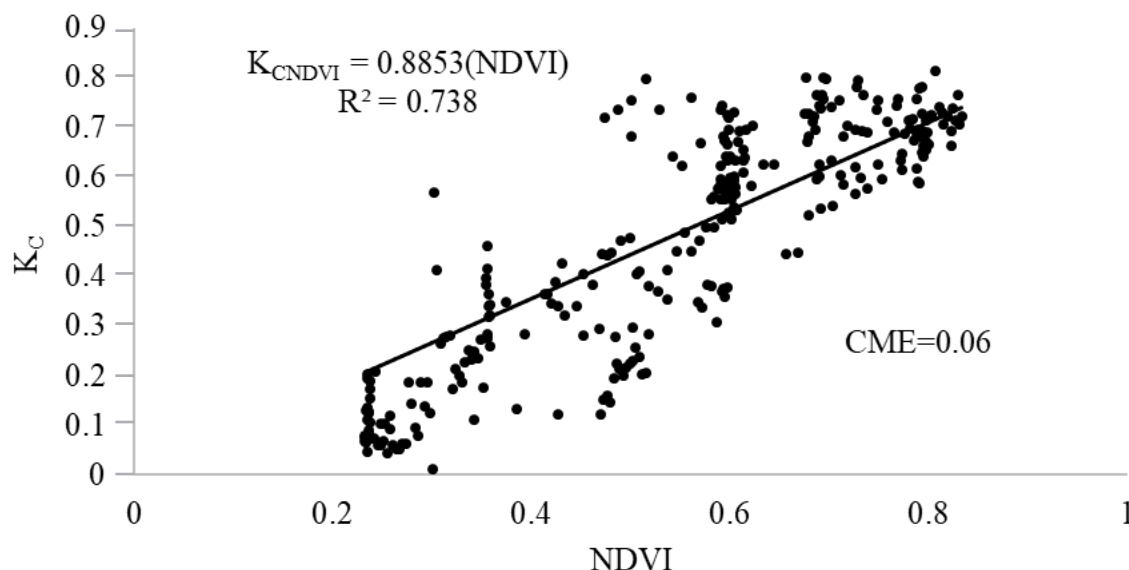


Figura 3. Relación entre el K_C y el NDVI de la parcela B3 plantada con uva de mesa cv. Perlette desde el año 2012.
Figure 3. Relationship between K_C and NDVI of the B3 plot planted with table grapes cv. Perlette since 2012.

cultivo de porte alto (alrededor de 2.25 m) el área de medición del radiómetro manual sobre el dosel del cultivo estuvo limitada. Por lo tanto, las diferencias en los valores de R^2 pueden ser resultado de una diferencia de escala.

Validación del modelo

Para la validación se aplicó el modelo generado (Figura 3) con los datos de NDVI del año 2019. La relación obtenida entre los valores de K_{CNDVI} y de K_C , mostró un $R^2 = 0.749$, un CME = 0.11 y una pendiente (0.8853) cercana a la unidad (Figura 4). El K_{CNDVI} obtenido con los datos de NDVI interpolado del año 2019 se multiplicó por la ET_0 del día correspondiente para estimar la ET_C del modelo. En lo subsecuente, se denominará ET_C a la variable medida con el sistema EC, y ET_{CEST} al resultado de multiplicar el K_{CNDVI} generado con el modelo por la ET_0 . La relación entre ET_C y ET_{CEST} se ajustó con una R^2 de 0.921 y un CME de 0.67 mm d^{-1} (Figura 5).

Al comparar las R^2 (Figura 4 y Figura 5) se puede observar un ajuste mayor en la segunda relación, a pesar de que los mismos valores de NDVI se usaron en ambas. Choudhury *et al.* (1994) encontraron una relación mejor entre el IAF y la ET_C que entre el IAF y el K_C , debido a las variaciones en la evaporación del

model. Hereafter, ET_C will be used to refer to the variable measured with the EC system, and ET_{CEST} to the result of multiplying the K_{CNDVI} generated with the model by the ET_0 . The relationship between ET_C and ET_{CEST} fitted with an R^2 of 0.921 and a CME of 0.67 mm d^{-1} (Figure 5).

When comparing both R^2 values (Figure 4 and Figure 5), a greater fit can be observed in the second relationship, even though the same values of NDVI were used. Choudhury *et al.* (1994) found a better relationship between LAI and ET_C than between LAI and K_C , due to the variations in soil evapotranspiration. Given that NDVI values are directly related with LAI of the crop, the relationship between K_C and K_{CNDVI} fitted in a lower degree than the relationship between ET_C and ET_{CEST} ; the highest values of R^2 were obtained in this latter relationship.

Comparison between data measured, and estimated with the model

In the monthly irrigation values, ET_0 , ET_C , ET_{CEST} and rain, and the monthly averages of K_C and K_{CNDVI} of the B3 plot, the data that received influence from the rainfall were included to obtain the averages (Table 2). The ET_0 values are around 1800 mm a^{-1} , as it is characteristic of the semi-arid climates (Er-Raki

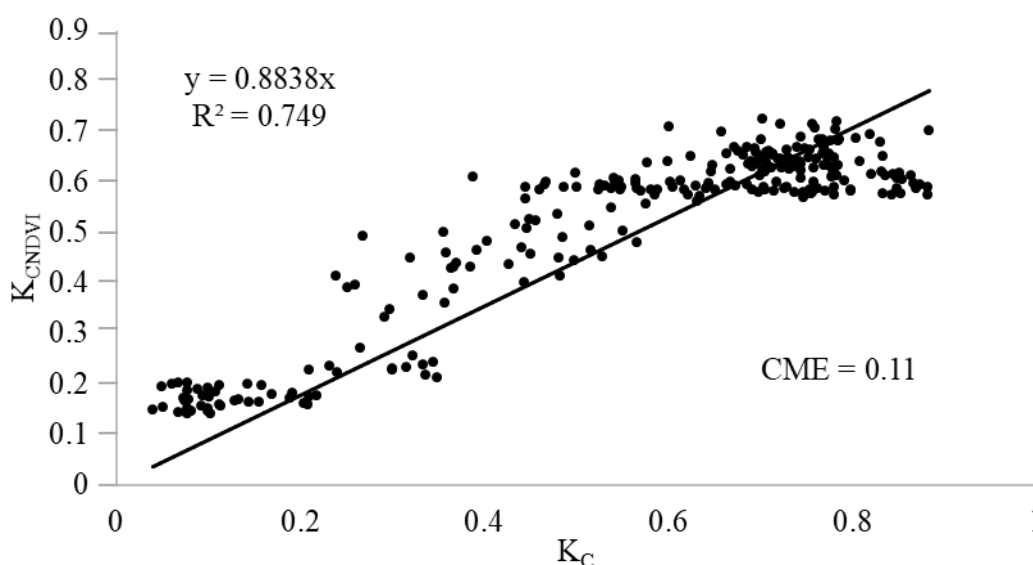


Figura 4. Relación entre el K_C medido con el método de EC y el K_{CNDVI} de la parcela B3 plantada con uva de mesa cv. Perlette desde el año 2012.

Figure 4. Relationship between the K_C measured with the method of EC and the K_{CNDVI} of the B3 plot planted with table grapes cv. Perlette since 2012.

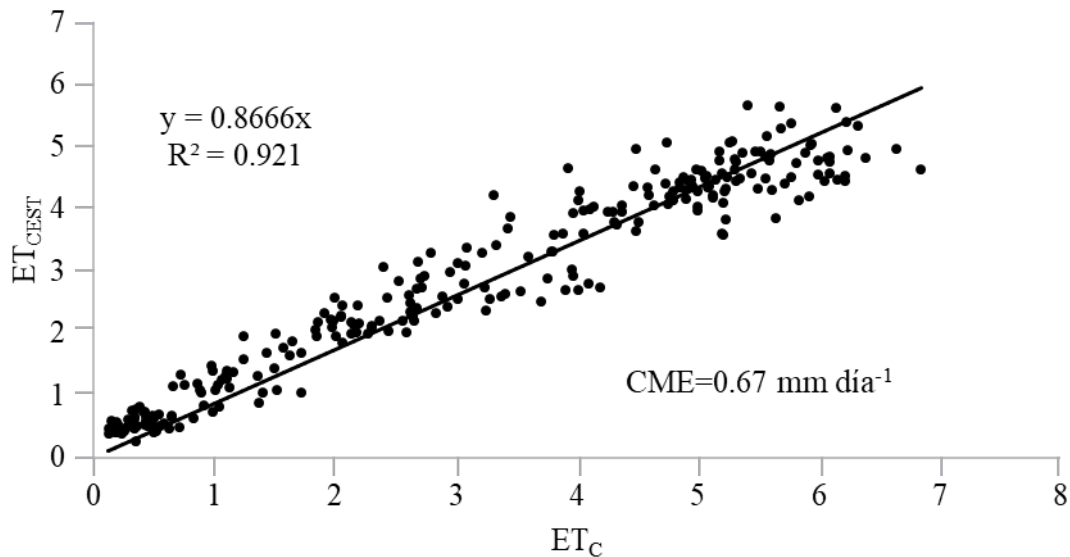


Figura 5. Relación entre la ET_C y la ET_{CEST} de la parcela B3 plantada con uva de mesa cv. Perlette desde el año 2012.
Figure 5. Relationship between ET_C and ET_{CEST} of the B3 plot planted with table grapes cv. Perlette since 2012.

suelo. Dado que los valores de NDVI se relacionaron de forma directa con el IAF del cultivo, la relación entre el K_C y el K_{CNDVI} tuvo grado de ajuste menor que la relación entre la ET_C y la ET_{CEST} ; los valores mayores de R^2 se obtuvieron en esta última relación.

Comparación entre datos medidos y estimados con el modelo

En los valores mensuales de riego, ET_0 , ET_C , ET_{CEST} y lluvia, y los promedios mensuales de K_C y K_{CNDVI} de la parcela B3, se incluyeron los datos que recibieron influencia de la lluvia para obtener los promedios (Cuadro 2). Los valores de ET_0 están alrededor de los 1800 mm a^{-1} , característico de los climas semiáridos (Er-Raki *et al.*, 2013). Respecto a los valores extremos de ET_0 , los valores mínimos se obtuvieron en invierno (1.47 mm d^{-1} en 2018 y 0.97 mm d^{-1} en 2019) y los máximos en verano (9.05 mm d^{-1} en 2018 y 9.62 mm d^{-1} en 2019). Er-Raki *et al.* (2013) observaron valores mínimos de ET_0 en invierno y otoño (2 mm d^{-1}) y máximos en verano (8.5 mm d^{-1} en 2005 y 9.5 mm d^{-1} en 2006).

Respecto a la ET_C , en 2018 el promedio fue de 3.02 mm d^{-1} y en 2019 fue de 3.2 mm d^{-1} , mientras que el promedio de ET_0 fue 5.3 y 4.9 mm d^{-1} . Así, la ET_C representó 57.1 y 64% de la ET_0 . Zermeño-

et al., 2013). Regarding the extreme values of ET_0 , the minimum values were obtained in winter (1.47 mm d^{-1} in 2018 and 0.97 mm d^{-1} in 2019), and the maximum in summer (9.05 mm d^{-1} in 2018 and 9.62 mm d^{-1} in 2019). Er-Raki *et al.* (2013) observed the minimum ET_0 values in winter and autumn (2 mm d^{-1}), and the maximum in summer (8.5 mm d^{-1} in 2005 and 9.5 mm d^{-1} in 2006).

Regarding ET_C , in 2018 the average was 3.02 mm d^{-1} and in 2019 it was 3.2 mm d^{-1} , while the average ET_0 was 5.3 and 4.9 mm d^{-1} . Thus, ET_C represented 57.1 and 64% out of ET_0 . Zermeño-González *et al.* (2017) explained this difference by the partial cover of the crop. As for the values of ET_C , Rodríguez *et al.* (2010) observed maximum values of 5 mm d^{-1} , and in this study during the summer the maximum values were 6.44 mm d^{-1} in 2018 and 7.74 mm d^{-1} in 2019. In general, the values of K_C and ET_C obtained by these authors differ from those shown in Table 2, although both studies were carried out in the same zone and with the same method. An important difference was the frequency of measurement, which in this study was 20 Hz; while Rodríguez *et al.* (2010) measured a frequency of 10 Hz. Allen *et al.* (2011) mentioned that measurements with the EC system are usually made at any frequency between 5 and 20 Hz, and 10 Hz is the most common. Thus,

Cuadro 2. Valores mensuales de riego, ET_0 , ET_C , ET_{CEST} y promedios mensuales de K_C y K_{CNDVI} de la parcela B3 plantada con uva de mesa cv. Perlette desde el año 2012.**Table 2. Monthly values of irrigation, ET_0 , ET_C , ET_{CEST} and monthly averages of K_C and K_{CNDVI} of the B3 plot planted with table grapes cv. Perlette since 2012.**

Mes	Riego (mm)		ET_0 (mm)		ET_C (mm)		ET_{CEST} (mm)		K_C		K_{CNDVI}	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
1	12	29	92	87	9	15	19	15	0.10	0.21	0.17	0.17
2	50	29	99	94	17	17	26	18	0.18	0.18	0.26	0.19
3	130	72	165	144	59	56	61	52	0.36	0.39	0.37	0.35
4	192	125	214	185	124	115	126	109	0.58	0.62	0.59	0.59
5	158	157	239	200	162	151	164	135	0.68	0.75	0.69	0.68
6	139	121	235	227	165	165	163	147	0.71	0.73	0.70	0.65
7	157	131	221	218	163	177	142	132	0.74	0.81	0.64	0.60
8	102	80	186	200	141	160	104	122	0.75	0.80	0.56	0.61
9	67	63	169	149	109	121	88	85	0.65	0.82	0.52	0.57
10	66	74	121	135	85	98	65	79	0.71	0.73	0.54	0.58
11	55	58	93	96	42	53	46	59	0.45	0.55	0.49	0.61
12	8	6	79	82	14	37	40	36	0.19	0.45	0.38	0.47
Total	1135	944	1912	1819	1090	1164	1044	989				

González *et al.* (2017) explicaron esa diferencia por la cobertura parcial del cultivo. En cuanto a los valores de ET_C , Rodríguez *et al.* (2010) observaron valores máximos de 5 mm d⁻¹, y en este estudio durante el verano los valores máximos fueron de 6.44 mm d⁻¹ en 2018 y de 7.74 mm d⁻¹ en 2019. En general, los valores de K_C y ET_C obtenidos por esos autores difieren de los mostrados en el Cuadro 2, aunque ambos estudios se realizaron en la misma zona y con el mismo método. Una diferencia importante fue la frecuencia de medición, en este estudio fue 20 Hz; mientras que Rodríguez *et al.* (2010) midieron a una frecuencia de 10 Hz. Allen *et al.* (2011) mencionaron que las mediciones con el sistema EC se realizan a una frecuencia de entre 5 y 20 Hz, y 10 Hz es la más común. Por ello, la frecuencia de medición no es una explicación satisfactoria ante las diferencias encontradas.

Durante la etapa de crecimiento y desarrollo de las plantas del viñedo, los K_C (Cuadro 2) fueron inferiores a los 0.30, 0.85 y 0.45, encontrados por Allen *et al.* (1998); esa fue una evidencia del efecto del riego localizado que provoca una reducción en la evaporación del suelo (Consoli y Vanella, 2014). Asimismo, se identificó que entre temporadas consecutivas los valores de K_C fueron diferentes. López-Urrea *et al.* (2012) también observaron este efecto; obtuvieron datos de K_C de 0.75, 0.60 y 0.72 de enero hasta la cosecha (agosto-septiembre), dichos valores fueron

the frequency of measurement is not a satisfactory explanation for the differences found.

During the growth and development stage of the vineyard, K_C (Table 2) were lower than those 0.30, 0.85 and 0.45 recorded by Allen *et al.* (1998); that is evidence of the effect from localized irrigation that reduced evaporation of the soil (Consoli and Vanella, 2014). Similarly, it was identified that between consecutive seasons K_C values were different; López-Urrea *et al.* (2012) also observed this effect, with K_C data of 0.75, 0.60 and 0.72 from January to harvest time (August-September), those values were determined with a weighing lysimeter in cv. Tempranillo in 2007, 2008 and 2009, respectively. That difference with this study is explained by the amount of cover, since table grapes need to intercept the highest amount of radiation. In contrast, in grapes for wine production the amount of cover must be limited in order to increase fruit quality.

Zermeño-González *et al.* (2017) estimated values of K_C higher than 1 from May to August, in wine grape cv. Shiraz. In their study, they multiplied the ET_0 by the factor of crop cover before using equation 5, which is why their K_C values were higher than those of this study; for only six K_C data greater than 1 were registered in the two years studied. These values were obtained during the rainy season, in which there was a reduction of ET_0 or an increment in ET_C due to

determinados con un lisímetro de pesada en cv. Tempranillo en 2007, 2008 y 2009, respectivamente. Esa diferencia con este estudio se explica por la cantidad de cobertura, ya que la uva de mesa requiere interceptar la mayor cantidad de radiación. En cambio, en la uva destinada a la producción de vino se debe limitar la cobertura para incrementar la calidad de la fruta.

Zermeño-González *et al.* (2017) estimaron valores de K_C mayores a 1 de mayo a agosto, en uva para vino cv. Shiraz. En su estudio, multiplicaron la ET_0 por el factor de cobertura del cultivo antes de aplicar la ecuación 5, razón por la cual sus valores de K_C fueron mayores a este estudio en el cual solo se registraron seis datos de K_C mayores a 1 en los dos años estudiados. Estos valores se obtuvieron durante la temporada de lluvias, en la cual se presentó una disminución de la ET_0 o un incremento de la ET_C debido a la mayor evaporación del suelo, tal como observaron Consoli y Barbagallo (2012).

En cuanto a los datos modelados, la variación de la ET_{CEST} es congruente con las fluctuaciones de la ET_C medida. Sin embargo, respecto a las condiciones climáticas y la fenología del cultivo se pueden definir cuatro tendencias claras de los datos estimados con el modelo durante el año (Cuadro 3).

1) Sobrestimación (enero-febrero). En esta temporada el NDVI dependió directamente de las características del suelo y los restos de la poda invernal,

a higher soil evaporation, as it was also observed by Consoli and Barbagallo (2012).

Regarding the modelled data, variation on ET_{CEST} is congruent with fluctuations of measured ET_C . However, as for climatic conditions and crop phenology, four clear tendencies can be defined from the data estimated with the model during the year (Table 3).

- 1) Overestimation (January-February). In this period NDVI depended directly on characteristics of the soil and remnants of the winter pruning, thus K_{CNDVI} was higher than K_C measured. This effect was observed only in 2018, because in 2019 there were rains that increased ET_C , due to a higher soil evaporation (Allen *et al.*, 1998; Consoli and Barbagallo, 2012), and therefore K_C also increased.
- 2) Adequate fit (March-June). Because it is the driest season of the year, the greatest quantity of images free of cloudiness were analyzed. In most of this period an image was processed every 5 d; this is the requirement for estimating ET_C with 80% accuracy (Alfieri *et al.*, 2017). This period is very important, because frequently a greater amount of water is supplied than what is required by the crop, due to the rapid growth of the foliage.
- 3) Underestimation (July-October). This is due to the smaller quantity of available images because

Cuadro 3. ET_C , ET_{CEST} , diferencia entre ET_C y ET_{CEST} , número de imágenes analizadas y precipitación durante cuatro periodos de desempeño del modelo en la parcela B3 plantada con uva de mesa cv. Perlette desde el año 2012.

Table 3. ET_C , ET_{CEST} , difference between ET_C and ET_{CEST} , number of images analyzed and rainfall during four periods of model performance in the B3 plot planted with table grapes cv. Perlette since 2012.

Periodo		Ene -feb	Mar-jun	Jul-oct	Nov-dic	Total
ET_C (mm)	2018	26	510	498	57	1090
ET_{CEST} (mm)	2018	45	514	399	86	1044
ET_C (mm)	2019	32	487	556	90	1164
ET_{CEST} (mm)	2019	33	443	418	95	989
$ET_C - ET_{CEST}$ (mm)	2018	-19	-4	99	-29	
	2019	-1	44	138	-5	
$ET_C - ET_{CEST}$ (%)	2018	73	0.8	20	51	
	2019	3	9	25	5	
Imágenes analizadas	2018	3	20	17	9	49
	2019	6	18	12	7	43
Precipitación (mm)	2018	0	6	230	0	236
	2019	10	6	83	161	260

por lo que el K_{CNDVI} fue mayor que el K_C medido. Tal efecto se apreció solo en 2018 porque en 2019 se presentaron lluvias que aumentaron la ET_C , debido a la mayor evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998; Consoli y Barbagallo, 2012), y por lo tanto el K_C también se incrementó.

- 2) Ajuste adecuado (marzo-junio). Por ser la temporada más seca del año se analizó la mayor cantidad de imágenes libres de nubosidad. En la mayor parte de este periodo se procesó una imagen cada 5 d, requisito para estimar la ET_C con una precisión del 80% (Alfieri *et al.*, 2017). Este periodo es muy importante porque debido al crecimiento rápido del follaje se suele aportar un volumen de agua mayor que el requerido por el cultivo.
- 3) Subestimación (julio-octubre). Ésta ocurre debido a la menor cantidad de imágenes disponibles por la temporada de lluvias y a la saturación del NDVI (Er-Raki *et al.*, 2013). A pesar de que el cultivo continuaba con el desarrollo del follaje y la evapotranspiración incrementó, el NDVI no lo detectó.

De manera que los valores de K_{CNDVI} y, en consecuencia, de ET_{CEST} fueron menores que el K_C y la ET_C medidos por el método de EC. Además, hubo una mayor diferencia entre la ET_C y la ET_{CEST} en 2019 (Cuadro 3), porque en ese año durante agosto y septiembre hubo dos periodos consecutivos de 20 y 25 d sin imágenes disponibles, los cuales tuvieron un efecto directo en los valores bajos de ET_{CEST} .

- 4) Sobreestimación (noviembre-diciembre). Debido a la senescencia, las hojas redujeron su tasa de evapotranspiración; pero el NDVI no pudo detectar tales cambios (Knipper *et al.*, 2019), por lo que se obtuvieron valores de K_{CNDVI} altos. En 2019 durante este periodo se presentaron lluvias, por lo tanto, el efecto fue menos evidente que en 2018.

Evapotranspiración a nivel de predio

Los mapas de ET_{CEST} para el periodo marzo-junio del 2019 (Figura 6) y de la ET_{CEST} anual (Figura 7) se realizaron tomando como base los mapas de K_{CNDVI} (48 de 2018 y 43 de 2019) obtenidos al aplicar el modelo generado (Figura 3). Estos mapas se multiplicaron por la ET_0 diaria y se usó el mapa de K_{CNDVI} desde un día después de la fecha de captura de la ima-

of the rainy season and the saturation of the NDVI (Er-Raki *et al.*, 2013). Even though vines continued their foliage development and evapotranspiration increased, NDVI did not detect this.

Thus, K_{CNDVI} values and consequently ET_{CEST} were lower than the K_C and ET_C measured by the EC method. Furthermore, there was a greater difference between ET_C and ET_{CEST} in 2019 (Table 3), because in that year during August and September there were two consecutive periods of 20 and 25 d without available images; those periods had a direct effect on the low ET_{CEST} values.

- 4) Overestimation (November-December).

Due to senescence, leaves reduced their evapotranspiration rate; but NDVI was unable to detect these changes (Knipper *et al.*, 2019); thus, high K_{CNDVI} values were obtained. In 2019 there were rains during this period, therefore this effect was less evident than that in 2018.

Evapotranspiration at plot scale

Maps of ET_{CEST} for March-June 2019 (Figure 6) and that of annual ET_{CEST} (Figure 7) were made based on the K_{CNDVI} maps (48 of 2018 and 43 of 2019) obtained with the generated model (Figure 3). These maps were multiplied by the daily ET_0 and the K_{CNDVI} map was used starting on the day after the date of the image, until the date at which the next available image was taken. Daily maps of ET_{CEST} were used to obtain ET_{CEST} values for the period of interest using equation 6.

During March-June 2019 (Figure 6), in the B3 plot (see Figure 1), average NDVI was 0.63 with variation from 0.55 to 0.67. Similarly, K_{CNDVI} varied from 0.49 to 0.59 with an average of 0.56. ET_{CEST} presented a mean value of 399 mm with an interval from 351 to 422 mm. When comparing the average ET_{CEST} with the ET_C data from this plot (Table 3), for the same period March-June in which the best fit of the model was showed, an underestimation of 88 mm (18%) was observed. This situation is attributed to the fact that the satellite imagery represented the heterogeneity with which the crop developed in each square of plantation, and therefore, also the different rates of evapotranspiration within the plot.

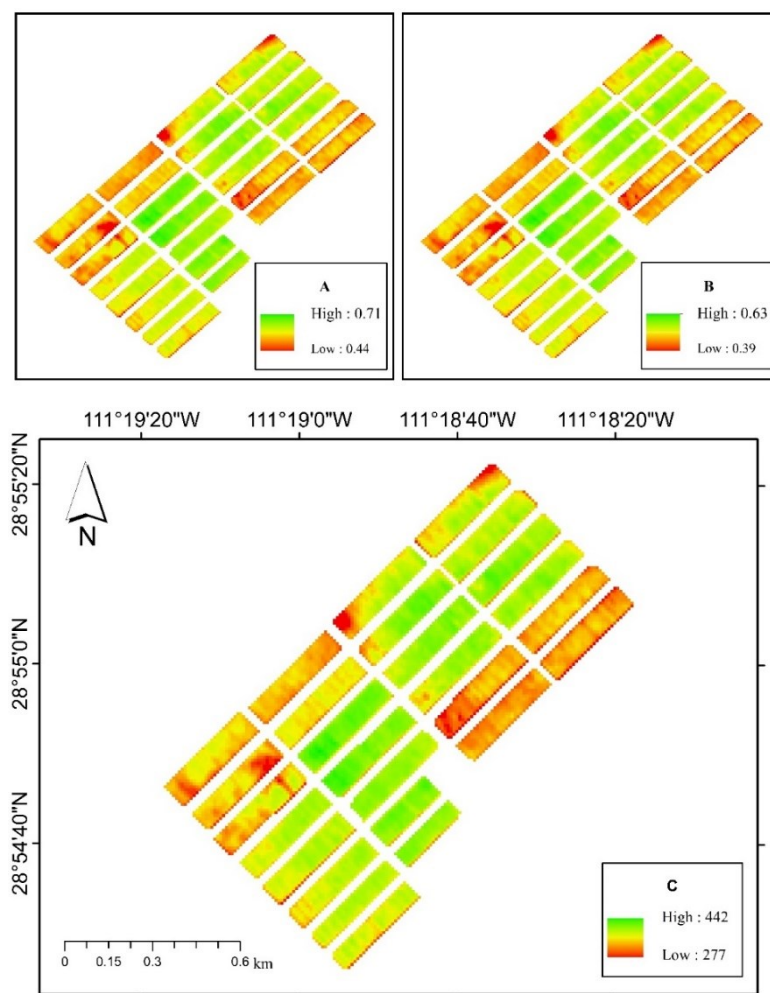


Figura 6. Promedio de NDVI (A), promedio de K_{CNDVI} (B) y ET_{CEST} (C) del periodo marzo – junio del año 2019, en un viñedo de uva de mesa en Sonora, México.

Figure 6. Average NDVI (A), K_{CNDVI} (B) and ET_{CEST} (C) in the period March-June 2019, within a vineyard of table grapes in Sonora, Mexico.

gen hasta la fecha de captura de la siguiente imagen disponible. Los mapas diarios de ET_{CEST} se utilizaron para obtener la ET_{CEST} del periodo de interés utilizando la ecuación 6.

Durante el periodo marzo-junio del año 2019 (Figura 6), en la parcela B3 (ver Figura 1), el promedio de NDVI fue 0.63 con variación de 0.55 a 0.67. Asimismo, el K_{CNDVI} varió de 0.49 a 0.59 con un promedio de 0.56. La ET_{CEST} presentó un valor medio de 399 mm con intervalo de 351 a 422 mm. Al comparar el valor promedio de ET_{CEST} con el dato de ET_C de dicha parcela (Cuadro 3), durante el mismo periodo marzo-junio en el cual se presentó el ajuste mejor del modelo, se observó una subestimación de

For the annual data of ET_{CEST} from the B3 plot (Figure 7), the average water evapotranspiration in 2019 was 990 mm with variation from 887 to 1046 mm, and the average value was lower by 174 mm (15%) than the ET_C measured in the B3 plot (Table 3). It is also observed that plots: A1, A2, A6, B1, B2, B5, B6, C7, D6, D7 and D8 presented the zones with the most contrasting values of ET_{CEST} in 2018. Of them, a reduction was observed in 2019, but the pattern was maintained. According to Knipper *et al.* (2018), this type of maps makes it possible to identify areas with stress from deficient irrigation or nutrition, poor functioning of the irrigation system, or other environmental stress.

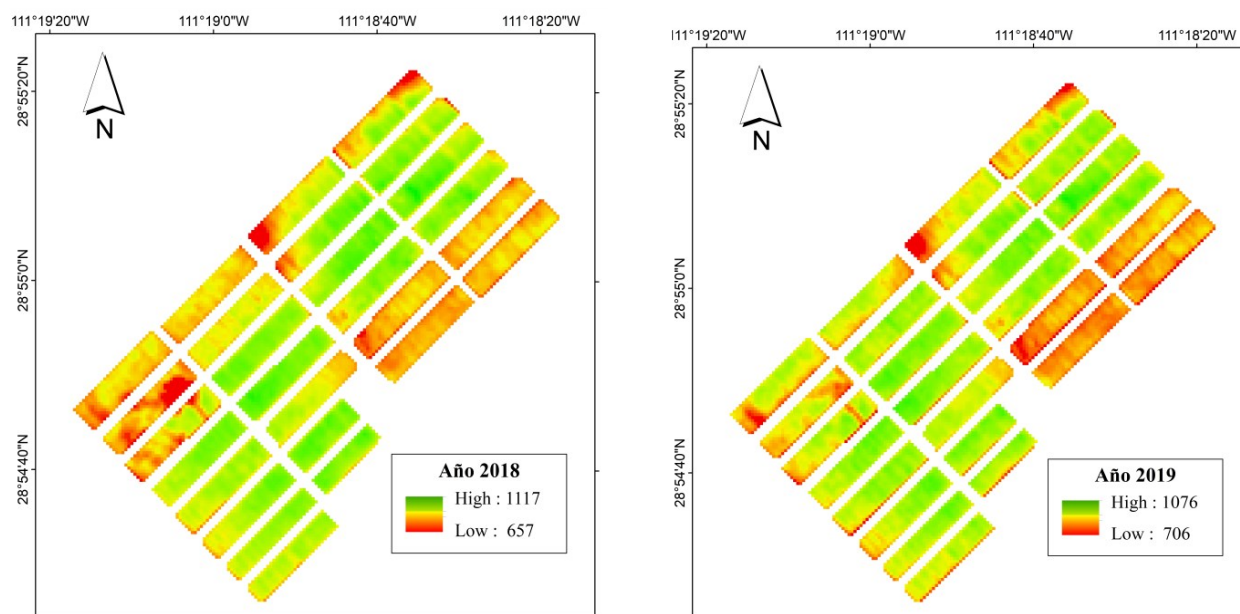


Figura 7. Mapas de evapotranspiración estimada a nivel de predio durante 2018 y 2019 en un viñedo de uva de mesa en Sonora, México.

Figure 7. Maps of evapotranspiration estimated at plot scale during 2018 and 2019 in a vineyard of table grapes in Sonora, Mexico.

88 mm (18%). Esta situación se atribuye a que las imágenes de satélite representaron la heterogeneidad con la cual se desarrolló el cultivo en cada cuadro de plantación y, a partir de ello, también las tasas de evapotranspiración diferentes dentro del predio.

Para los datos anuales de ET_{CEST} de la parcela B3 (Figura 7), la lámina evapotranspirada promedio en 2019 fue 990 mm con variación de 887 a 1046 mm, y el valor promedio fue menor en 174 mm (15%) que la ET_c medida en la parcela B3 (Cuadro 3). También se observa que las parcelas A1, A2, A6, B1, B2, B5, B6, C7, D6, D7 y D8 presentaron las zonas con valores de ET_{CEST} más contrastantes en 2018, de las cuales se observó una disminución en 2019, pero el patrón se mantuvo. De acuerdo con Knipper *et al.* (2018) este tipo de mapas permiten identificar áreas con estrés por riego o nutrición deficiente, mal funcionamiento en el sistema de riego u otro estrés ambiental.

Esta información es de gran utilidad para técnicos y productores, ya que con estos mapas se identifican aquellas áreas donde se presenta algún tipo de estrés y se les da prioridad para su corrección rápida en el manejo de esas parcelas. Por esta razón es necesario

This information is of great use for technicians and producers, as these maps identify those areas where some type of stress is present, and priority can be given for rapid correction in the management of these plots. Therefore, it is necessary to generate these products in zones such as the Costa de Hermosillo, where the quantity of available images is high, for their extensive use. Regardless Knipper *et al.* (2019) mentioned that the estimations of ET_c based on the NDVI do not appropriately distinguish the spatial diversity due to their slow response to the indicators of stress, and furthermore, that the real conditions of the canopy are only available during the image is taken.

CONCLUSIONS

The methodology proposed for estimating the value of the coefficient of fit for crop development (K_c) as a function of the NDVI interpolated daily, underestimated the evapotranspiration from the annual crop by just 11% in relation to the value obtained with the Eddy covariance method, thus it is considered adequate for this purpose.

generar estos productos en zonas como la Costa de Hermosillo donde la cantidad de imágenes disponibles es alta, para su uso extensivo. A pesar de que Knipper *et al.* (2019) mencionaron que las estimaciones de ET_C basadas en el NDVI no distinguen de forma apropiada la diversidad espacial debido a su respuesta lenta ante los indicadores de estrés y, además, que las condiciones reales del dosel solo están disponibles durante la toma de la imagen.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta para estimar el valor del coeficiente de ajuste por desarrollo de cultivo (K_c) en función del valor del NDVI interpolado diario, subestimó sólo un 11% de la evapotranspiración del cultivo anual respecto al valor obtenido con el método de covarianza de vórtices; por lo tanto, se considera adecuada para este propósito.

La estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_C) a nivel de predio fue 15% inferior, pero tiene la ventaja de ser aplicable a extensiones grandes de áreas cultivadas. Además, el cálculo de ET_C en forma espacialmente explícita a nivel pixel es importante para el manejo del riego a nivel parcela, ya que permite conocer el volumen de agua evapotranspirada por cada sección de riego y cuadro de plantación.

El método propuesto estimó con precisión adecuada la ET_C del viñedo, con una resolución temporal de 5 a 10 días en función de la disponibilidad de imágenes de satélite. Por medio de la interpolación de esos datos se pudo estimar la evapotranspiración diaria del cultivo. La mejor funcionalidad del modelo se presentó en la primavera, la etapa de desarrollo máximo del cultivo y de la contribución menor de la humedad del suelo a la evaporación, por la cobertura foliar mayor en los viñedos de uva de mesa.

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) y la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID), por los fondos para la investigación con el proyecto “Incremento de la eficiencia y cuidado del agua mediante experiencia conjunta entre comunidades de Sonora-México y Linares-Chile”. Al productor cooperante del predio Viñas de la Costa, Costa de Hermosillo, México, por su colaboración fundamental para llevar a cabo el estudio.

The estimation of the crop evapotranspiration (ET_C) at the plot scale was 15% lower, but it has the advantage of being applicable to large extensions of cultivated areas. Furthermore, the calculation of ET_C in spatially explicit form at a pixel precision is important for the management of irrigation at the plot scale, since it makes possible to know the volume of evapotranspiration water for each irrigation section and square of plantation.

The proposed method estimated with adequate precision the ET_C of the vineyard, with a temporal resolution of 5 to 10 days as a function of the availability of satellite images. By means of the interpolation of these data it was possible to estimate the daily crop evapotranspiration. The best functionality of the model occurred in the spring, the stage of maximum crop development and of the lowest contribution of soil moisture to evapotranspiration, due to the greater foliar cover in the vineyards of table grapes.

ACKNOWLEDGEMENTS

To Fondo de la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) and Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID), for funding this research through the project “Incremento de la eficiencia y cuidado del agua mediante experiencia conjunta entre comunidades de Sonora-México y Linares-Chile”. To the cooperative producer of the plot “Viñas de la Costa”, at Costa de Hermosillo, Mexico, for his decisive collaboration for this study.

—End of the English version—

---*---

LITERATURA CITADA

- Alfieri, J. G., M. G. Anderson, W. P. Kustas, and C. Cammalleri. 2017. Effect of the revisit interval and temporal upscaling methods on the accuracy of remotely sensed evapotranspiration estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21: 83–98.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy. ISBN 92-5-104219-5. 300 p.

- Allen, R. G., L. S. Pereira, T. A. Howell, and M. E. Jensen. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manage.* 98: 899-920.
- Burba, G. 2013. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications. A field book on measuring ecosystem gas Exchange and areal emissions rates. LI-COR Biosciences. Lincoln, NE, USA. 331 p.
- Campos, I., C. M. U. Neale, A. Calera, C. Balbotin, and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98: 45-54.
- Chavez, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 62: 1025-1036.
- Choudhury, B. J., N. U. Ahmed, S. B. Idso, R. J. Reginato, and C. S. T. Daughtry. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sens. Environ.* 50: 1-17.
- Consoli, S., and S. Barbagallo. 2012. Estimating water requirements of an irrigated mediterranean vineyard using a satellite-based approach. *J. Irrig. Drain Eng.* 138: 896-904.
- Consoli, S., and D. Vanella. 2014. Mapping crop evapotranspiration by integrating vegetation indices into a soil water balance model. *Agric. Water Manage.* 143: 71-81.
- Cuesta A., A. Montoro, A. M. Jochum, P. López, y A. Calera. 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes satelitales. ITEA. 101: 212-224.
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 144 p.
- Er-Raki, S., J. C. Rodríguez, J. Garatuza-Payan, C. J. Watts, and A. Chehbouni. 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agric. Water Manage.* 122: 12-19.
- Ham, J. M., and J. L. Heilman. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path Eddy covariance. *Agron. J.* 95: 1393-1403.
- Hernández P., J. 2019. Desarrollo tecnológico e integración comercial de los productores agrícolas de la Costa de Hermosillo en la globalización. *Reg. Soc.* 31: 1-25.
- Jiang, Z., A. R. Huete, J. Chen, Y. Chen, L. Jing, G. Yan, and X. Zhang. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.* 101: 366-378.
- Knipper, K. R., W. P. Kustas, M. C. Anderson, J. G. Alfieri, J. H. Prueger, C. R. Hain, F. Gao, Y. Yang, L.G. McKee, H. Nieto, E. H. Hipps, M. M. Alsina, and L. Sanchez. 2018. Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards. *Irrig. Sci.* 37: 431-449.
- Knipper, K. R., W. P. Kustas, M. C. Anderson, M. M. Alsina, C. R. Hain, J. G. Alfieri, J. H. Prueger, F. Gao, L. G. McKee, and L. A. Sanchez. 2019. Using high-spatiotemporal thermal satellite ET retrievals for operational water use and stress monitoring in a California vineyard. *Remote Sens.* 11: 2124.
- López-Urrea, R. A. Montoro, F. Mañas, P. López-Fuster, and E. Fereres. 2012. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature 'Tempranillo' wine grapes. *Agric. Water Manage.* 112: 13-20.
- Paz, F., E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2015. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoam.* 33: 27-49.
- Pôças, I., A. Calera, I. Campos, and M. Cunha. 2020. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agric. Water Manage.* 233: 1060-1081.
- Rodríguez, J., J. Grageda, C. Watts, J. Garatuza-Payan, A. Castellanos-Villegas, J. Rodríguez-Casas, and V. Olavarrieta. 2010. Water use by perennial crops in the lower Sonora watershed. *J. J. Arid. Environ.* 74: 603-610.
- Rouse, J. W., R. H., J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt, MD. 371 p.
- Salazar, A. A., J. L. Moreno V., y A. N. Lutz L. 2012. Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo. *Reg. Soc.* 3: 155-179.
- The Max Planck Institute for Biogeochemistry. 2020. Eddy covariance procedure. <http://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/brew/REddyProc.rhtml> (Consultado: enero 2020).
- Van Kesteren, B., O.K. Hartogensis, D. Van Dinther, A.F. Moene, and H.A.R. De Bruin, 2013. Measuring H₂O and CO₂ fluxes at field scales using scintillometry. Part II. Validation and application of 1-min flux estimates. *Agric. Forest Meteorol.* 178-179: 88-105.
- Zermeño-González, A., A. Melendres-Alvarez, L. Fuerte-Mosqueda, J. Munguía-López, y L. Ibarra-Jiménez. 2017. Tasa de evapotranspiración del cultivo de la vid y su relación con la de referencia del método FAO Penman-Monteith. *Agrociencia* 51: 1 - 12.

