

Desarrollo del coeficiente de cultivo para cártamo forrajero basado en índices de vegetación

Development of crop coefficient for forage safflower based on vegetation indices

Arturo Reyes-González¹, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6983-0905>

David G. Reta-Sánchez², ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4202-9106>

Juan I. Sánchez-Duarte³, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9778-5558>

Víctor M. Rodríguez-Moreno⁴, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0238-5381>

Enrique Hernández-Leal⁵, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0760-227X>

Iván Franco-Gaytán⁶, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2686-6972>

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna, Matamoros, Coahuila, México, reyes.arturo@inifap.gob.mx

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Delicias, Delicias, Chihuahua, México, reta.david@inifap.gob.mx

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna, Matamoros, Coahuila, México, sanchez.juan@inifap.gob.mx

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Pabellón, Aguascalientes, México, rodriguez.victor@inifap.gob.mx

⁵Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna, Matamoros, Coahuila, México, hernandez.enrique@inifap.gob.mx

⁶Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna, Matamoros, Coahuila, México, franco.ivan@inifap.gob.mx

Autor para correspondencia: Arturo Reyes-González, reyes.arturo@inifap.gob.mx

Resumen

El coeficiente de cultivo (K_c) es esencial para la programación del riego en la agricultura. Los objetivos de este estudio fueron monitorear la altura e índice de vegetación NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI por sus siglas en inglés) del cártamo durante dos ciclos de cultivo, desarrollar un nuevo K_c con base en el NDVI y calcular la evapotranspiración de cultivo (ET_c), tomando en cuenta los valores de K_c . El estudio se realizó en los ciclos otoño-invierno 2016-2017 y 2017-2018 en Matamoros, Coahuila, México. Se evaluaron los cultivares Guayalejo,

Selkino y CD-868. La siembra se realizó en un suelo seco el 10 y 12 de diciembre de 2016 y 2017, respectivamente. En el ciclo 2016-2017 se aplicaron tres riegos de auxilio y en el ciclo 2017-2018 dos. El $NDVI_{campo}$ se obtuvo con el equipo GreenSeeker y el $NDVI_{satelital}$ de imágenes Landsat 7 y 8. Se estableció una relación entre el $NDVI_{campo}$ y el Kc tomado del manual 56 de la FAO. Los resultados indicaron curvas similares de $NDVI_{campo}$ en ambos ciclos. Altos coeficientes de determinación ($r^2 = 0.93$ y 0.89) se obtuvieron entre el $NDVI_{campo}$ y el Kc de FAO-56. Se generó una ecuación lineal ($Kc = 1.064 * NDVI + 0.212$) para ambos ciclos. Los nuevos valores de Kc se multiplicaron por la evapotranspiración de referencia (ET_o) para calcular ET_c . Con esta ecuación se propone un modelo de cálculo para derivar recomendaciones de lámina de riego acordes con la etapa fenológica del cártamo.

Palabras clave: GreenSeeker, evapotranspiración, calendario de riego.

Abstract

The crop coefficient (Kc) is essential to irrigation scheduling in agriculture. The objectives of this study were to monitor height and vegetation index NDVI in safflower during two growing seasons, develop a new crop coefficient (Kc) based on NDVI and calculate crop evapotranspiration (ET_c) taking Kc values. The study was carried out in autumn-winter 2016-2017 and 2017-2018 growing seasons in Matamoros, Coahuila, Mexico. The cultivars evaluated were Guayalejo, Selkino and CD-868. Sowing was done in dry soil on December 10 and 12, of 2016 and 2017, respectively. In growing season 2016-2017 three irrigations were applied and 2017-2018 two. $NDVI_{field}$ values were derived from GreenSeeker and $NDVI_{satellite}$

were derived from Landsat 7 and 8 images. A relationship between $NDVI_{field}$ and Kc taken from FAO-56 Manual was established. The results indicated similar NDVI curves in both growing seasons. High determination coefficients ($r^2 = 0.93$ and 0.89) were recorded between $NDVI_{field}$ and Kc FAO-56. A linear equation ($Kc = 1.064 * NDVI + 0.212$) for both growing seasons was generated. The new Kc values were multiplied by the reference evapotranspiration (ET_0) to calculate ET_c . With this equation a calculation model is proposed to derive recommendation irrigation according to safflower phenological stage.

Keywords: GreenSeeker, evapotranspiration, irrigation scheduling.

Recibido: 07/11/2019

Aceptado: 27/02/2020

Introducción

Según la Comisión Nacional del Agua (Conagua), el uso consuntivo del recurso hídrico por el sector agrícola es de 76% (Conagua, 2018). El sistema de producción agrícola es el usuario principal del agua, pero no necesariamente la utiliza de manera eficiente (Reyes-González,

Kjaersgaard, Trooien, Hay, & Ahiablame, 2018). Los productores aplican más agua de riego de la que requiere el cultivo. Ante la perspectiva de mejorar el aprovechamiento del agua de riego y eficientar su uso, es esencial implementar medidas que estimen con mayor eficiencia la demanda hídrica de los cultivos.

El requerimiento hídrico de los cultivos es equivalente al valor de la evapotranspiración real del cultivo (ET_c). Para su cálculo deben incluirse datos de las condiciones meteorológicas, de la capacidad de retención de humedad del suelo y de la etapa fenológica del cultivo. Un método útil para estimar la ET_c es multiplicar la evapotranspiración de referencia (ET_o) por un coeficiente de cultivo (K_c) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). La ET_o se estima con base en datos meteorológicos de temperatura del aire, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa. Dada la naturaleza cambiante de los factores que intervienen en su cálculo, el K_c puede ser tomado como referencia en la literatura (Doorenbos & Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1998) o bien, calculado directamente en el terreno a través de sensores; estas observaciones se asociarían de forma directa con la etapa fenológica del cultivo.

Factores bióticos y abióticos que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo, como estrés hídrico, deficiencia-exceso de nutrientes, daño por plagas y enfermedades, entre otros, afectan el valor de K_c y lo desvían del valor de referencia publicado. Un número importante de autores sugieren que es mejor utilizar valores de K_c provenientes de índices de vegetación, en lugar de K_c de tablas, ya que éste representa la situación actual del cultivo (Bausch, 1993; Gontia & Tiwari, 2010; Lei & Yang, 2014; Adamala, Rajwade, & Reddy, 2016), y su uso como referencia puede

mejorar la programación y empleo eficiente del agua (Kar, Kumar, & Martha, 2007).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index-NDVI*; Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974) se ha utilizado para el monitoreo de la vegetación, estimación de rendimiento de cultivos y detección de estrés (Kamble, Kilic, & Hubbard, 2013). En diversos trabajos de investigación se ha demostrado que los índices de vegetación (estimados con satélite o a través de dispositivos en campo) son empleados como base confiable para pronosticar con precisión los *Kc* de diferentes cultivos (Bausch & Neale, 1987; Jayanthi, Neale, & Wright, 2007; Irmak *et al.*, 2011; Reyes-González *et al.*, 2019). Se han incluido cultivos como alfalfa (Wright, 1982); trigo (Garatuza-Payán, Tamayo, Watts, & Rodríguez, 2003); frijol (Laike, Tilahum, K., & Hordofa, 2006); caña de azúcar (González-Dugo & Mateos, 2008); cebolla (Trout, 2008); sorgo (Sing & Irmak, 2009); uva (Campos, Neale, Calera, Balbontín, & Gonzalez-Piqueiras, 2010), y maíz (Reyes-González *et al.*, 2019). Sin embargo, la relación entre el $NDVI_{\text{campo}}$ proveniente del GreenSeeker con el *Kc* tomado del manual de la FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) en cártamo forrajero no se ha explorado.

El cártamo es una planta que crece cada año con un tallo principal, ramas primarias que pueden producir ramas secundarias y terciarias. Cada rama termina con una cabeza de flor (capítulo) provista de espinas (Dobrin & Marin, 2015). La altura de planta, número de ramas y presencia de espinas en las hojas depende de la variedad y del medio ambiente (Dajue & Mundel, 1996). El cártamo es tolerante a altas temperaturas, salinidad y sequía (Dwiedi, Upadhyaya, & Hegde, 2005; Tayebi, Afshari,

Farahvash, Sinki, & Nezarat, 2012). Estas propiedades son importantes en el desarrollo de la planta y su rendimiento (Saruhan, Saglam, Demiralay, & Kadioğlu, 2012; Tayebi *et al.*, 2012).

Investigaciones realizadas en Irán, Turquía, India, Rumania, Italia y Brasil, entre otros, se han enfocado en conocer las necesidades de diferentes niveles de nitrógeno (Arslan & Bayraktar, 2015; Bonfim-Silva Paludo, Sousa, de Freitas Sousa, & Da Silva, 2015); densidad de plantación (Mohammadi, Ghassemi-Golezani, Zehtab-Salmasi, & Nasrollahzaade, 2013; Vaghar, Shamsi, Kobraee, & Behrooz, 2014); niveles de riego (Istanbuluoglu, 2009; Jalali, Salehi, & Bahrani, 2011), y eficiencia en el uso del agua en cártamo (Kar *et al.*, 2007; Lovelli, Perniola, Ferrara, & Di Tommaso, 2007). Sin embargo, en México existe poca o nula información que haya documentado obtener un K_c en cártamo forrajero para mejorar la programación del riego. Debido a lo anterior, los objetivos de la investigación fueron monitorear la altura y el índice de vegetación NDVI del cártamo durante dos ciclos de cultivo, desarrollar un nuevo K_c con base en el índice de vegetación para cártamo forrajero en la Comarca Lagunera, México, y calcular la ET_c tomando en cuenta los nuevos valores de K_c .

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo durante los ciclos de otoño-invierno 2016-2017 y 2017-2018 en el estable E. y C. Asociados, en el Ejido Purísima, municipio de Matamoros, Coahuila, México (Figura 1). La preparación del terreno consistió en barbecho, rastreo y nivelación con láser. Se evaluaron tres cultivares de cártamo: uno con espinas (Guayalejo) y dos sin espinas (Selkino y CD-868). La fertilización se realizó sobre el terreno barbechado, utilizando una dosis de 150-50-00 unidades de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente. Como fuente de N se usó un fertilizante nitrogenado con inhibidor de la nitrificación (3.4-Dimetilpirazol fosfato) y como fuente de P₂O₅ se empleó fosfato monoamónico. Los fertilizantes se incorporaron con un paso de rastra, para después nivelar el terreno. La parcela experimental fue de dos hectáreas.

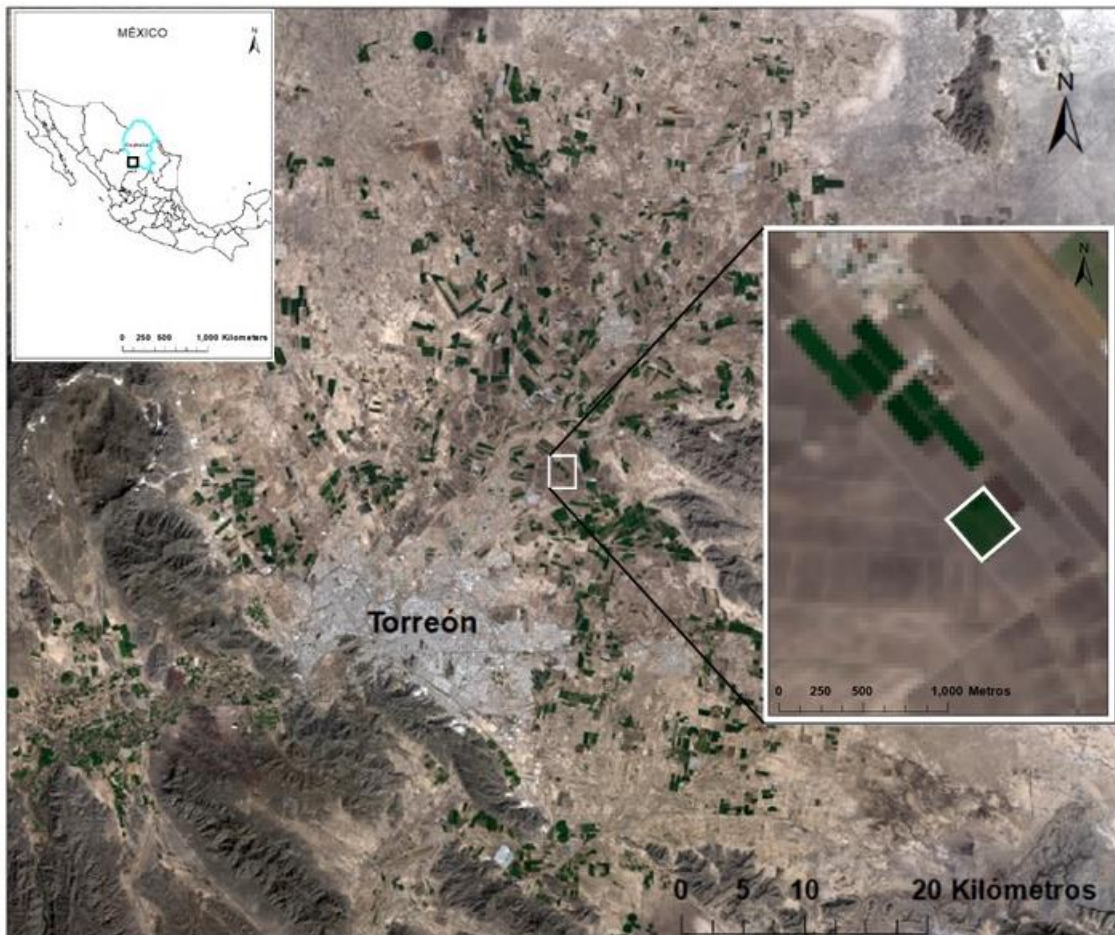


Figura 1. Localización del área de estudio. La parcela se representa en el recuadro interno.

Establecimiento del cultivo

La siembra se llevó a cabo con una sembradora de granos pequeños en un suelo seco el 10 y 12 de diciembre de 2016 y 2017, respectivamente, utilizando una densidad de siembra de 50 kg ha⁻¹; tres días después, se aplicó el riego de siembra. En el ciclo 2016-2017 se hicieron tres riegos de auxilio a los 20, 37 y 58 días después de la siembra (DDS); y en el ciclo 2017-2018, dos riegos de auxilio a los 30 y 48 DDS. El manejo del cultivo estuvo a cargo del productor.

Medición del NDVI

El NDVI se empezó a medir a los 37 DDS en el ciclo 2016-2017 y a los 25 en el ciclo 2017-2018, a una altura de 0.6 m sobre el dosel del cultivo cada ocho días, pues es la frecuencia en que los satélites Landsat 7 y 8 pasan por el área de estudio. Se efectuaron cinco mediciones por día por cultivar en 10 m lineales en el centro de la parcela. Las mediciones fueron a las 10:00 a.m., con orientación de este a oeste, con el equipo GreenSeeker, diseñado por la Universidad Estatal de Oklahoma y comercializado por la compañía NTech Industries (Ukiah, CA, EUA). El GreenSeeker funciona dirigiendo un haz de luz roja (0.660 μm), así como un- infrarrojo cercano (0.780 μm) al dosel del cultivo. El campo de visión es un óvalo que va de 25 a 50 cm, dependiendo de la altura a la que se encuentre el GreenSeeker con respecto al dosel del cultivo. La altura de medición que se usó fue de 0.6 m, teniendo un campo de visión de 40

cm. El NDVI_{campo} obtenido del GreenSeeker para los tres cultivares de cártamo se comparó con el NDVI_{satelital} estimado por sensores remotos.

Imágenes de satélite

Se utilizaron cinco imágenes de satélite en el ciclo 2016-2017 y siete en el 2017-2018 para estimar el NDVI. Las imágenes se colectaron de los satélites Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+) y Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) y *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (*path* = 30, *row* = 42) (Tabla 1). Cada imagen fue tratada por corrección radiométrica, atmosférica y superficie iluminada (Kjaersgaard & Allen, 2010). Las imágenes se seleccionaron con base en la cobertura temporal y las condiciones sin nubes. Las imágenes con nubes ubicadas a más de 10 km del área de interés se consideraron aceptables y fueron procesadas siguiendo las recomendaciones de Allen, Tasumi y Trezza (2007), y Kjaersgaard y Allen (2010), utilizando el modelo *METRIC*, a través del software *ERDAS Imagine* versión 14.0.

Tabla 1. La tabla muestra fecha, DDS y número de Landsat de las imágenes utilizadas en el estudio.

Fecha de imagen	DDS	# Landsat
-----------------	-----	-----------

19/01/17	37	8
27/01/17	45	7
04/02/17	53	8
20/02/17	69	8
08/03/17	85	8
06/01/18	25	8
14/01/18	33	7
22/01/18	41	8
30/01/18	49	7
23/02/18	73	8
03/03/18	81	7
11/03/18	89	8

El NDVI se estimó con el valor de reflectancia de las longitudes de onda rojo e infrarrojo cercano. Para el producto de Landsat 7 ETM+ se usaron las bandas 3 (0.63 a 0.69 μm) y 4 (0.77 a 0.90 μm), y para Landsat 8 OLI las bandas 4 (0.636 a 0.673 μm) y 5 (0.851 a 0.879 μm). Para evitar la mezcla de píxeles de $\text{NDVI}_{\text{satelital}}$ se utilizó el píxel ubicado en el centro de la parcela, al igual que las mediciones con GreenSeeker. En último lugar se obtuvo un modelo de datos asimilados entre el $\text{NDVI}_{\text{satelital}}$ y el $\text{NDVI}_{\text{campo}}$.

Altura de planta

Se midió con una cinta métrica desde la superficie del suelo hasta la última rama del cultivo, tomando 10 lecturas por cultivar, por día, y fueron promediadas. Las lecturas se registraron en la misma fecha en la que se tomó el $NDVI_{\text{campo}}$ (ocho días), coincidiendo con el paso del satélite Landsat.

Relación entre $NDVI_{\text{campo}}$ y Kc FAO-56

Se estableció la relación entre el $NDVI_{\text{campo}}$ y el Kc real con base en el manual FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) para ambos ciclos. La ecuación general obtenida en los dos ciclos se usó para proponer un valor de Kc como una función de $NDVI$. Al final, los valores del nuevo Kc se multiplicaron por ET_o para generar la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) y compararla con la evapotranspiración de referencia, la cual se tomó de la estación meteorológica del INIFAP, campo experimental La Laguna, al igual que la precipitación y las unidades calor.

Resultados y discusión

Precipitación y evapotranspiración

La precipitación acumulada fue de 25.6 mm para el ciclo 2016-2017 y de 38.4 mm para 2017-2018. La precipitación se observó con mejor distribución en el primer año de estudio, ya que los mayores eventos sucedieron al final del ciclo, después de los riegos de auxilio (Figura 2). Los valores diarios de evapotranspiración de referencia (ET_o) variaron de 1.0 a 6.8 mm día⁻¹ en el ciclo 2016-2017 y de 0.4 a 5.5 mm día⁻¹ en el ciclo 2017-2018. Sin embargo, los valores acumulados durante el ciclo del cultivo (de siembra a cosecha) fueron similares (267 mm para el ciclo 2016-2017 y 266 mm para el ciclo 2017-2018). Como era de esperarse, el valor mínimo de ET_o se registró al inicio de cada ciclo de producción y el valor máximo al final del mismo. Estos valores coincidieron con las temperaturas promedio anotadas en la Comarca Lagunera, donde las temperaturas frías (10 °C) son características del mes de enero y las templadas (20 °C) en marzo. Por otro lado, la Figura 3 muestra la acumulación de unidades calor en los dos ciclos de cultivo, registrándose 1 075 unidades calor en el primero y 1 050 en el segundo.

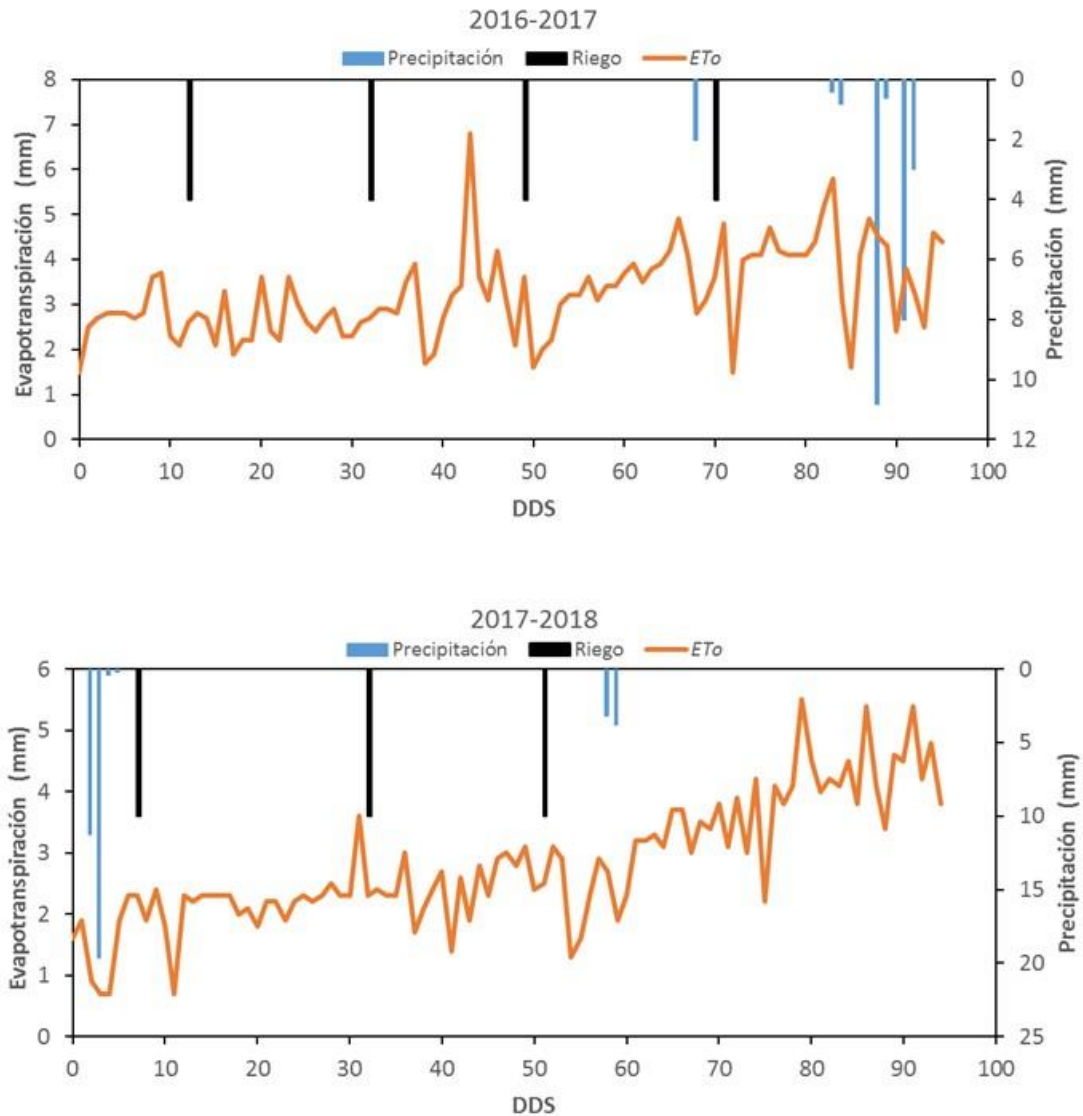


Figura 2. Precipitación, riego y *ETo* en dos ciclos de cultivo de cártamo forrajero en Matamoros, Coahuila.

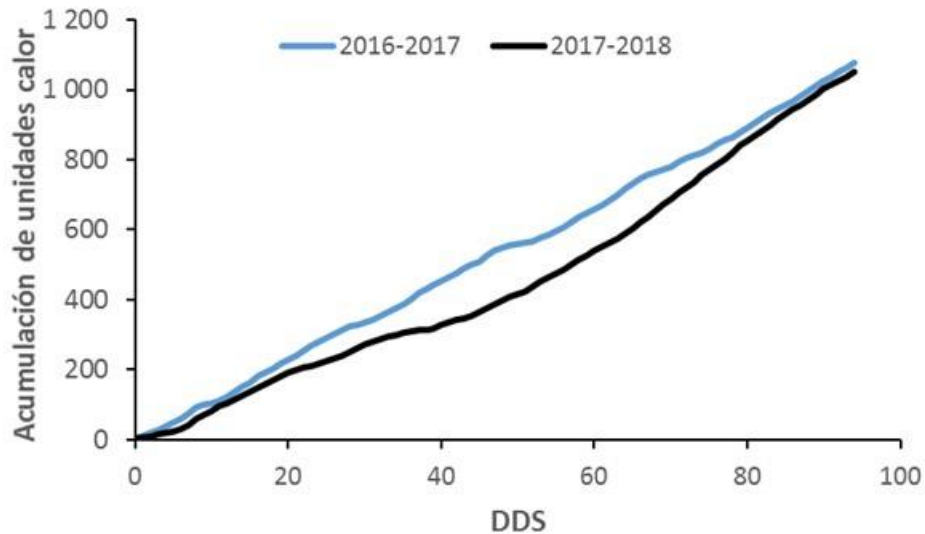


Figura 3. Acumulación de unidades calor en cártamo forrajero durante dos ciclos en Matamoros, Coahuila.

Curvas de NDVI

Las curvas de NDVI mostraron estar asociadas con las etapas fenológicas del cultivo y sólo al final del ciclo de producción se notaron divergentes. Esto debido a que el último riego para el ciclo 2016-2017 se aplicó el 9 de febrero de 2017 (58 DDS), además de recibir una precipitación de 14.6 mm antes de la cosecha; mientras que en 2017-2018 el último riego fue el primero de febrero de 2018 (51 DDS) y recibió una lluvia de 7 mm antes de la cosecha. Así, los valores de NDVI en 2016-2017 se

mantuvieron en 0.8 y los valores en 2017-2018 disminuyeron a 0.6 al final del ciclo (Figura 4). Sin embargo, Tasumi, Allen, Trezza y Wright (2005) reportaron que los valores de NDVI no son afectados por la humedad del suelo en un estudio que realizó en 383 campos agrícolas al sur de Idaho, EUA. En general, los valores de NDVI tomados en campo con el GreenSeeker para ambos ciclos fueron en promedio 0.2, 0.8 y 0.6 para la etapa inicial, madurez y senescencia, respectivamente. Valores similares de NDVI fueron reportados por Hajare, Patil y Verma (2008) durante dos ciclos en el cultivo de cártamo sembrado en tres tipos de suelo en Nagpur, India, aunque al final del ciclo caen hasta un valor de 0.2 cuando el cultivo se encontraba seco.

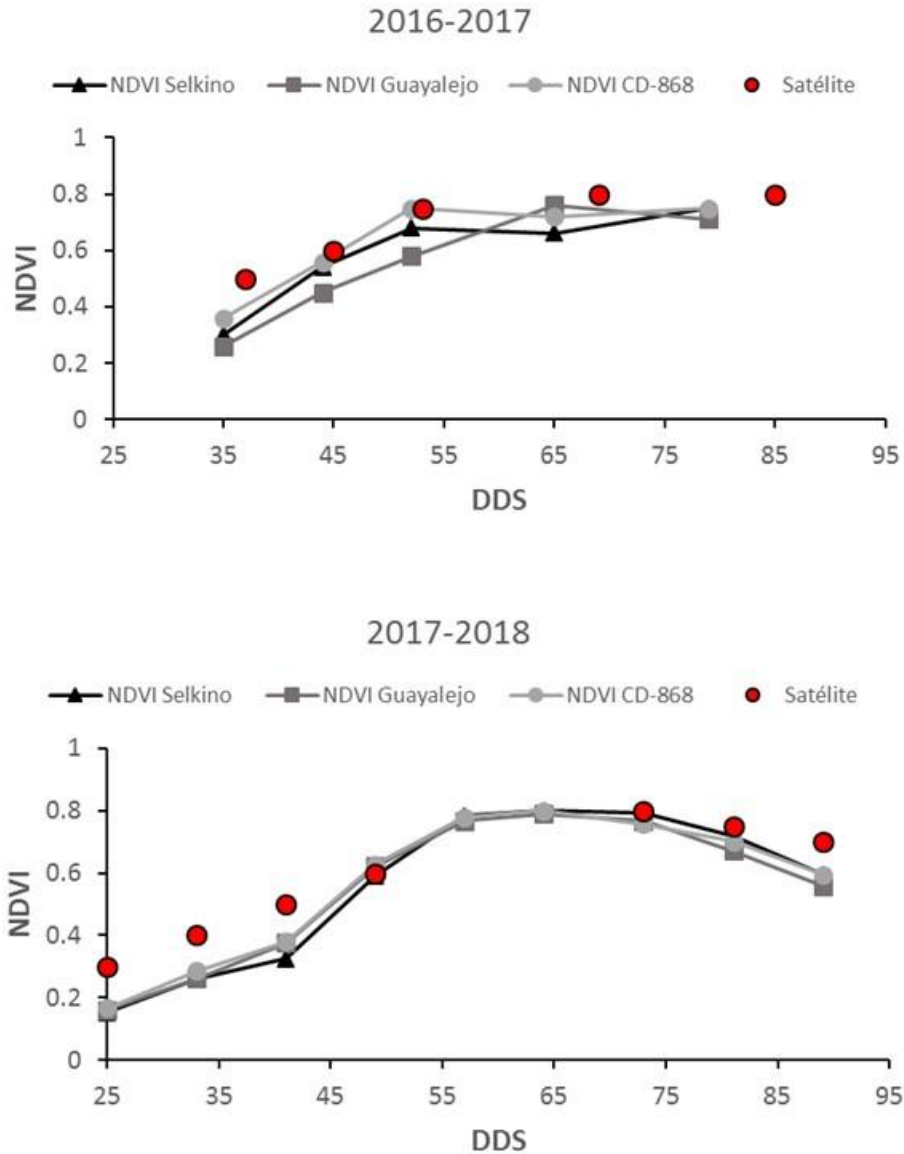


Figura 4. Curvas de NDVI tomados con el GreenSeeker para tres cultivares de cártamo. Los círculos rojos representan el NDVI derivado del satélite en dos ciclos de cultivo.

La discrepancia entre valores de NDVI, derivado del satélite y los valores tomados en campo con el GreenSeeker fueron mayores al inicio y al final del ciclo (Figura 4). Esta diferencia se debió a que las mediciones en campo son directamente al dosel del cultivo, cubriendo un área de alrededor de 0.4 m; mientras que con el satélite, las estimaciones son de un área de 30 x 30 m, midiendo follaje y suelo desnudo. Las mediciones en campo se realizaron el mismo día y a la misma hora en que el satélite pasa por el área de estudio. Las imágenes utilizadas fueron de días sin nubes.

Curvas similares de NDVI en trigo, caña de azúcar, algodón y maíz fueron reportadas por Garatuza-Payán *et al.* (2003); Zhang, Anderson, y Wang (2015); French, Hunsaker y Thorp (2015), y Reyes-González *et al.* (2019), respectivamente. Estos autores encontraron discrepancia en la primera y última etapa del cultivo entre las imágenes de satélite y las mediciones en campo. Los resultados sugieren que el periodo de mayor diferencia entre el satélite y el GreenSeeker se presenta cuando los valores de NDVI son menores a 0.6, pues con el satélite se recomienda utilizar el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Huete, 1988), ya que éste minimiza la reflectancia del suelo en las primeras y últimas etapas del cultivo cuando hay escasa cobertura vegetal. Por otro lado, Reyes-González *et al.* (2018) documentaron que al inicio y término de la estación de crecimiento del maíz, el valor obtenido de ET a partir del NDVI fue menos preciso. Sin embargo, para propósitos de calendarios de riego, este método puede ser aceptable. En otro estudio, Anderson, Allen, Morse y Kustas (2012) reportaron que la *ETc* calculada a partir de índices de vegetación siempre fue subestimada en áreas irrigadas de Idaho, EUA.

En la Figura 5 se muestra el desarrollo de la cobertura vegetal del cártamo variedad CD-868 durante el ciclo 2017-2018, el cual empezó con valores bajos; después se va incrementando y al final disminuye ligeramente. Dicha figura presenta la estrecha relación entre la cobertura vegetal y el índice de vegetación.

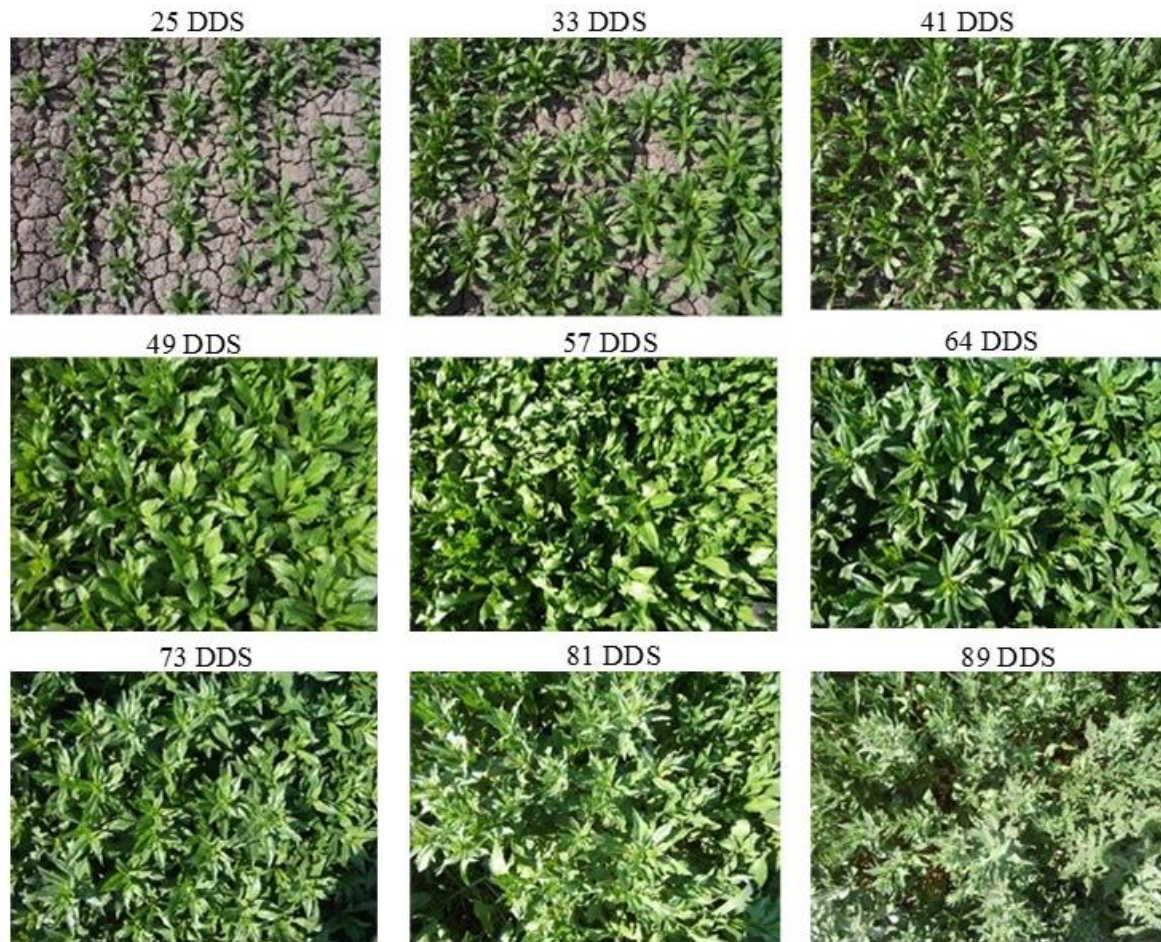


Figura 5. Desarrollo de la cobertura vegetal del cártamo variedad CD-868 en el Establo E. y C. Asociados durante el ciclo 2017-2018.

Relación entre $NDVI_{\text{campo}}$ y $NDVI_{\text{satelital}}$

Con las imágenes del satélite se obtuvieron cinco valores de NDVI en 2017-2018 y siete en 2017-2018. La Figura 6 expone la relación entre el NDVI adquirido en campo y el NDVI obtenido con las imágenes. Se encontró una buena relación entre lo medido y estimado, con un alto coeficiente de determinación ($r^2 = 0.96$). Este grado de confiabilidad muestra que el satélite es una herramienta útil, no sólo para estimar el NDVI a escala regional sino también a escala de campo. Altas correlaciones ($r^2 = 90$) de NDVI entre lo medido en campo con el radiómetro (MSR87) y estimado con sensores remotos fueron analizados por Duchemin *et al.* (2006) en 13 campos agrícolas en Marruecos, África.

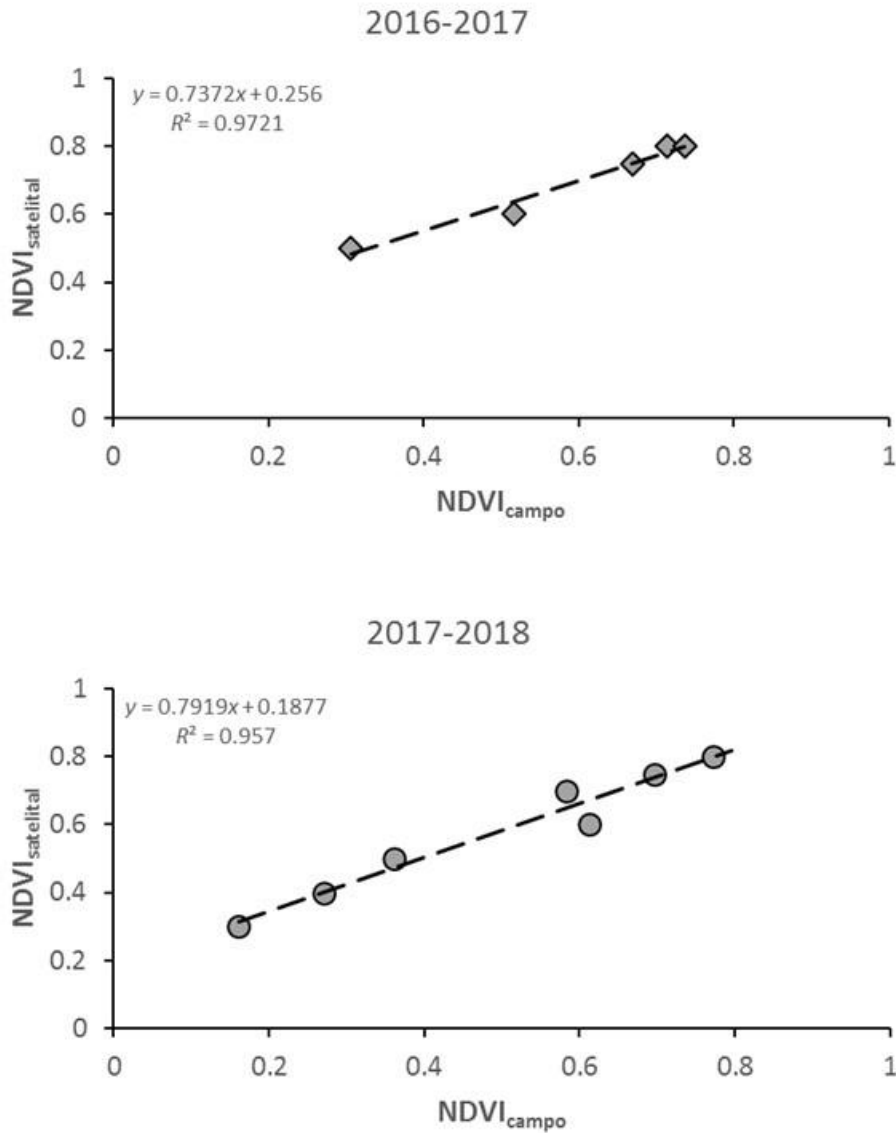


Figura 6. Relaciones lineales entre el $NDVI_{campo}$ y $NDVI_{satelital}$ en dos ciclos de cultivo de cártamo forrajero.

Altura de planta

La Figura 7 indica la dinámica de crecimiento en altura de planta de los tres cultivares de cártamo evaluados durante los dos ciclos de estudio. A los 25 DDS, el cultivo mostró una altura de ~ 5 cm y en la etapa de roseta una altura de 10 cm (40 DDS). A continuación, a los 44 DDS, se inició la elongación del tallo hasta alcanzar la etapa reproductiva con el comienzo de la formación del capítulo a los 80 DDS, con una altura de planta entre los 90 y 100 cm. El tallo y ramas continúan creciendo junto con la diferenciación y desarrollo de las partes del capítulo que se hicieron distinguibles a los 93 DDS, aunque el capítulo aún no estaba abierto. En esta fecha, las plantas alcanzaron entre 111 y 151 cm de altura. Los cultivares Guayalejo y CD-868 presentaron la mayor altura de planta, y el cultivar Selkino mostró la menor en ambos ciclos. En trabajos anteriores se reportó que el cultivo presentó un ciclo de crecimiento entre 82 y 95 DDS, alcanzando alturas entre 82 y 93 cm (Reta *et al.*, 2014; Reta *et al.*, 2017). Esta comparación indica que las alturas de planta fueron superiores a las observadas en trabajos previos en la región. También fueron superiores a las alturas reportadas por Tayebi *et al.* (2012), quienes obtuvieron alturas máximas de 80 cm en cártamo establecido con diferentes niveles de evapotranspiración en Tabriz, Irán. Sin embargo, alturas similares (de 104 a 149 cm) fueron reportadas por Kizil, Cakmak, Kirici y Inan (2008) en cultivares de cártamo establecidos en Eskishehir, Turquía. No obstante, Bagheri, Saeedi y Zaeh (2006) mencionan que la humedad disponible en el suelo afectó la altura de planta en un estudio realizado en Isfahán, Irán.

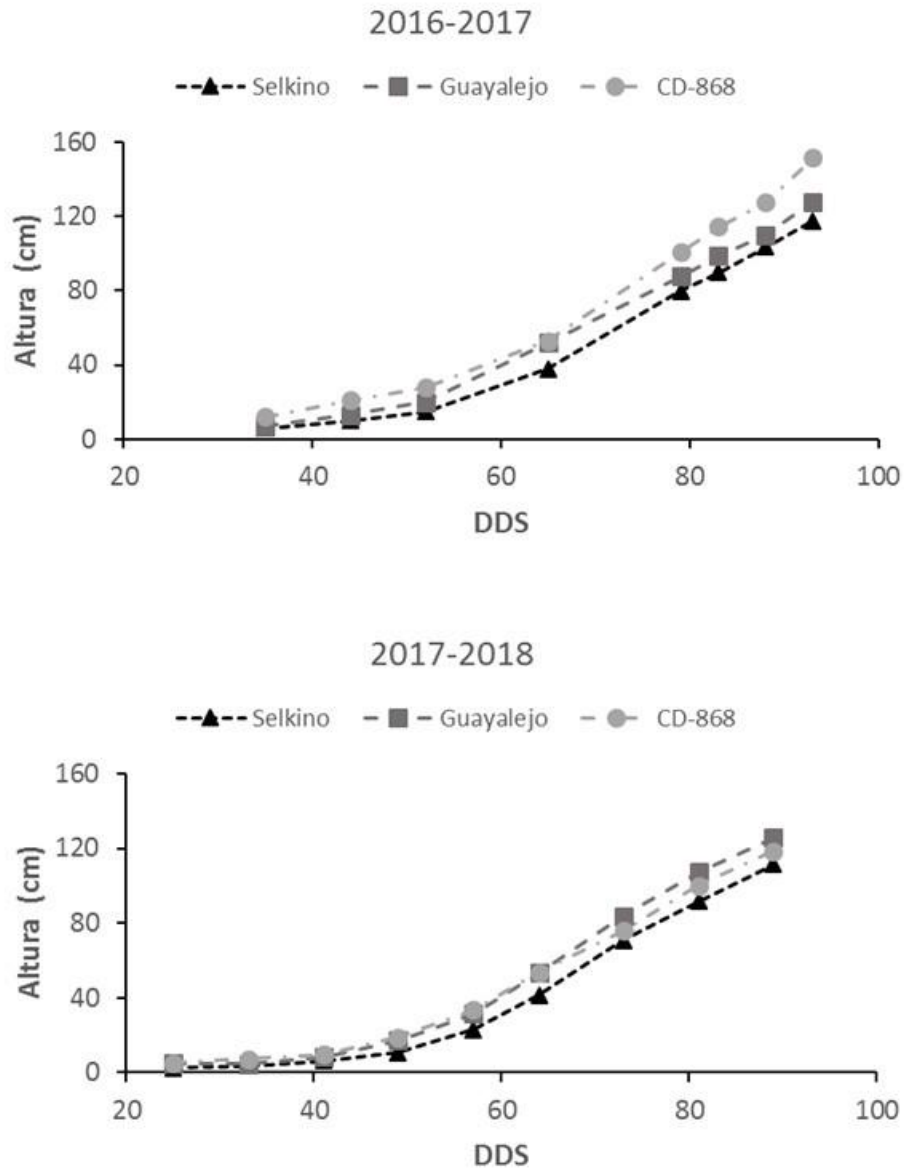


Figura 7. Altura de planta de tres cultivares de cártamo forrajero en la Comarca Lagunera.

Por otro lado, la Figura 8 señala una relación polinomial de segundo orden entre la altura de planta y el NDVI de los cultivares de cártamo, lo que explica entre 64 y 92% la variación total observada del NDVI en el primer ciclo (2016-2017), y entre 83 y 87% en el segundo ciclo (2017-2018).

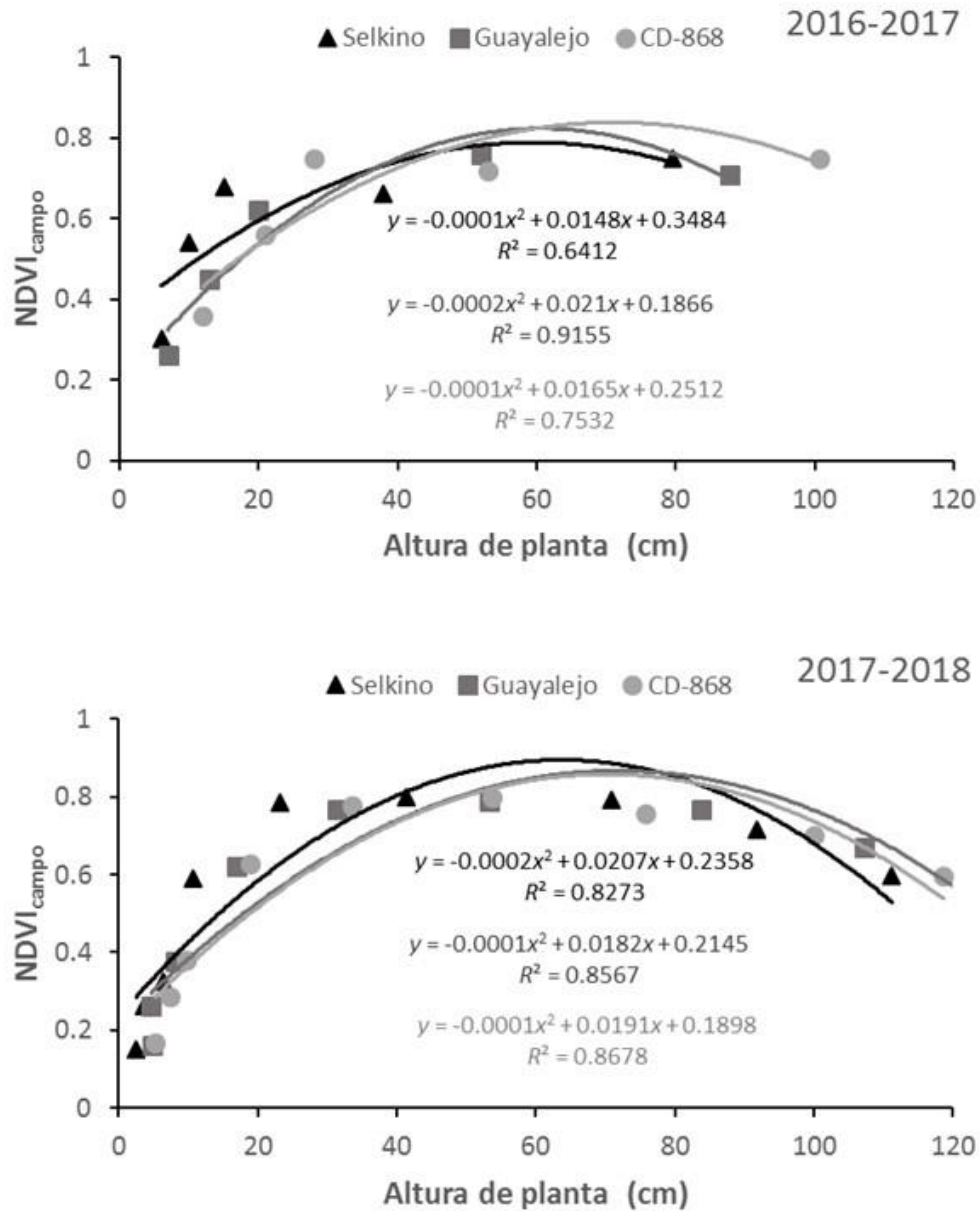


Figura 8. Relación entre la altura de planta y el NDVI de tres cultivares de cártamo forrajero en la Comarca Lagunera.

Relación entre $NDVI_{\text{campo}}$ y Kc FAO-56

Los valores de NDVI se tomaron de tres cultivares de cártamo evaluados durante dos ciclos, mientras que los valores de Kc real se obtuvieron del manual de la FAO-56. La Figura 9 muestra la relación entre el $NDVI_{\text{campo}}$ de tres cultivares de cártamo y el Kc tabulado para dos estaciones de crecimiento. En el primer ciclo de cultivo la relación entre el $NDVI_{\text{campo}}$ y el Kc mostró una $r^2 = 0.93$; para el segundo ciclo de 0.89 indicó una buena relación entre $NDVI_{\text{campo}}$ y Kc . Sin embargo, en el segundo ciclo, el valor de "r" disminuyó ligeramente, esto se debió a que el cultivo presentó condiciones de estrés por causa de la mala programación de los riegos, pues sólo se aplicaron dos riegos de auxilio a la mala distribución de la lluvia durante el ciclo de cultivo. Por tal motivo, la relación entre $NDVI_{\text{campo}}$ y Kc fue ligeramente baja, ya que los Kc de la FAO están desarrollados para cultivos bien regados y sin restricciones de humedad y nutrimentos (Allen *et al.*, 1998). No obstante, los valores de Kc FAO-56 después de los 50 DDS fue de 1.0, mientras que los valores de $NDVI_{\text{campo}}$ oscilaron entre 0.65 y 0.8.

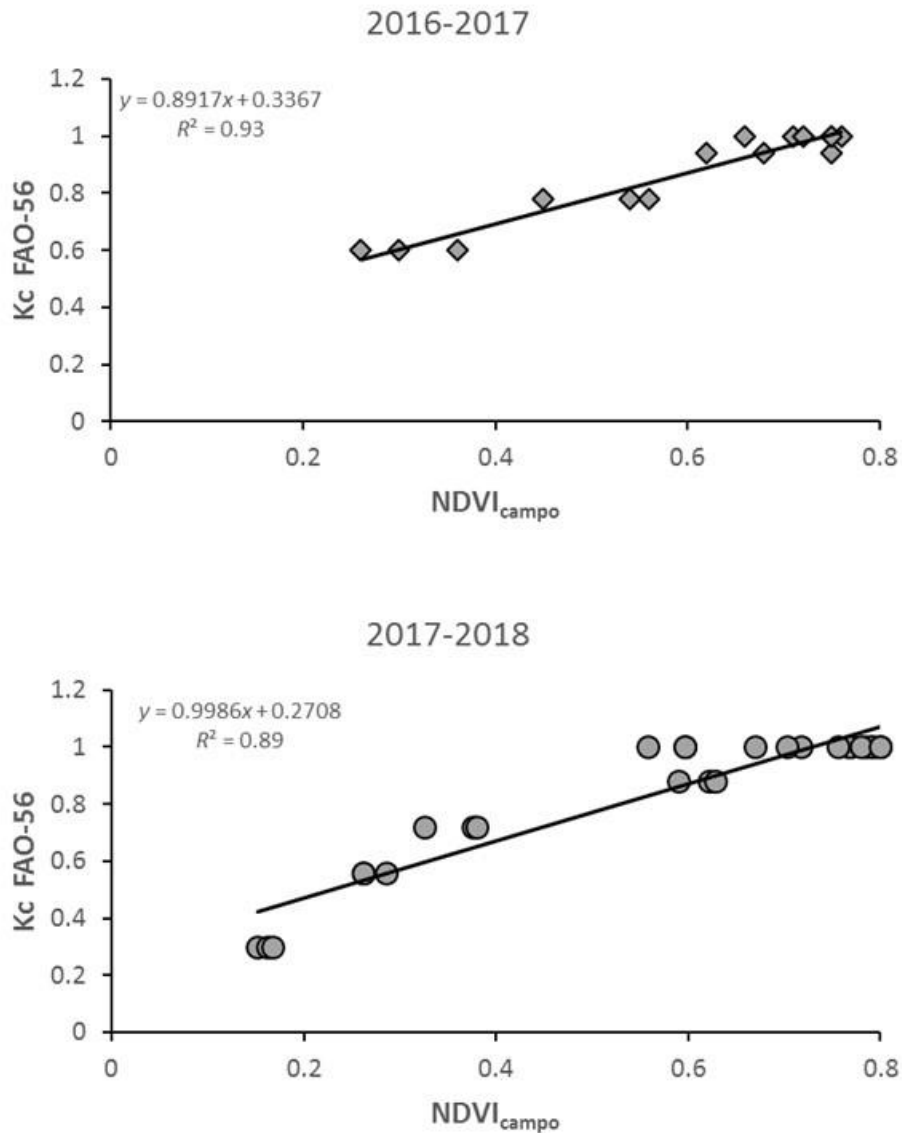


Figura 9. Relación entre el $NDVI_{campo}$ de tres cultivares de cártamo forrajero y el Kc de la FAO-56 en dos estaciones de crecimiento.

Se han reportado altas correlaciones entre $NDVI_{campo}$ y Kc , tomado de tablas de la FAO para diversos cultivos. Rocha, Perdigão, Melo y Henriques (2012), así como Reyes-González *et al.* (2016) reportaron altos

coeficientes de determinación ($r^2 = 0.99$), para el cultivo de maíz y alfalfa. Consoli, Russo y Snyder (2006); Sing e Irmak (2009); Gontia y Tiwari (2010); Kukal, Irmak y Kilic (2017), y Palacios-Vélez, Palacios-Sánchez y Espinosa-Espinosa (2018) reportaron buenas relaciones entre NDVI y K_c para el cultivo de naranja ($r^2 = 0.80$), sorgo ($r^2 = 0.87$), trigo ($r^2 = 0.80$), soya ($r^2 = 0.81$) y uva ($r^2 = 0.83$), respectivamente. Las diferencias entre altas y bajas relaciones se dan principalmente por el manejo de cultivo.

Desarrollo de la ecuación general de K_c

El NDVI tomado en campo y el K_c obtenido de la FAO-56 se usó para desarrollar ecuaciones de regresión lineal para dos estaciones de crecimiento (Figura 9). Las ecuaciones obtenidas para ambos ciclos fueron comparadas utilizando el método de prueba de "t" para probar la diferencia estadística entre dos regresiones independientes. Una vez realizada la prueba, el valor de "t" calculada fue menor (0.76) que el valor de "t" tabulada (1.68), lo cual indica que no hubo diferencia estadística significativa entre las dos ecuaciones. Con base en este resultado, todos los datos (dos ciclos) se agruparon y se generó una nueva ecuación para el cultivo de cártamo en la Comarca Lagunera (Figura 10).

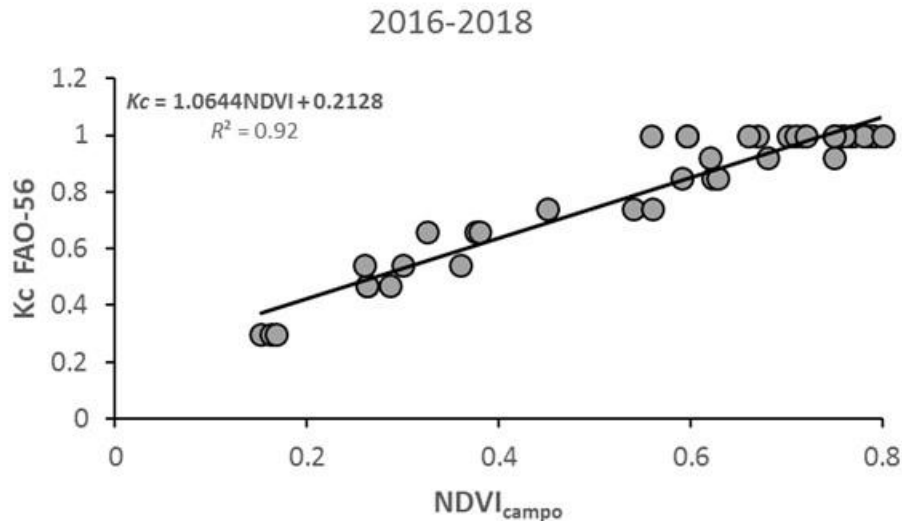


Figura 10. Relación entre el NDVI_{campo} y el K_c obtenido de la FAO-56 para dos años de estudio.

Se han generado diversas ecuaciones a partir de índices de vegetación para diferentes cultivos. Por ejemplo, Consoli *et al.* (2006) desarrollaron una ecuación utilizando el NDVI en el cultivo de naranja en Italia ($K_c = 1.2562 * NDVI + 0.287$); Singh e Irmak (2009), para soya en EUA ($K_c = 1.217 * NDVI - 0.034$); Campos *et al.* (2010), para uva en España ($K_c = 1.44 * NDVI - 0.10$); Gontia y Tiwari (2010) para trigo en la India ($K_c = 2.7109 * NDVI - 0.424$); Rocha *et al.* (2012) para maíz en Portugal ($K_c = 1.37 * NDVI - 0.017$), y Reyes-González, Hay, Kjaersgaard, y Neale (2015) para alfalfa en México ($K_c = 2.112 * NDVI - 0.4989$). Estas ecuaciones se generaron para desarrollar nuevos valores de K_c en condiciones locales, como lo recomiendan Doorenbos y Pruitt (1977), y Allen *et al.* (1998), con el objetivo de mejorar el manejo y uso del agua en la agricultura.

La ecuación generada ($Kc = 1.0644 * NDVI + 0.2128$), en la Figura 10 se empleó para desarrollar una nueva curva de Kc para el cártamo forrajero, tomando en consideración los días después de la siembra (Figura 11). Valores similares de Kc para cártamo las reportaron Kar *et al.* (2007) en Dhenkanal, India, quienes informaron valores de 0.37 en la etapa inicial, 0.94 en desarrollo, 1.29 en madurez y 0.35 al final de la estación de crecimiento. Sin embargo, en las dos últimas etapas (madurez y final) hubo una discrepancia con los encontrados en este estudio, lo cual fue más notable al final del ciclo, ya que el cártamo evaluado en la Comarca Lagunera se utiliza para forraje y se cosecha en verde, por lo que no alcanza la madurez fisiológica, como el cártamo que se utiliza para semilla.

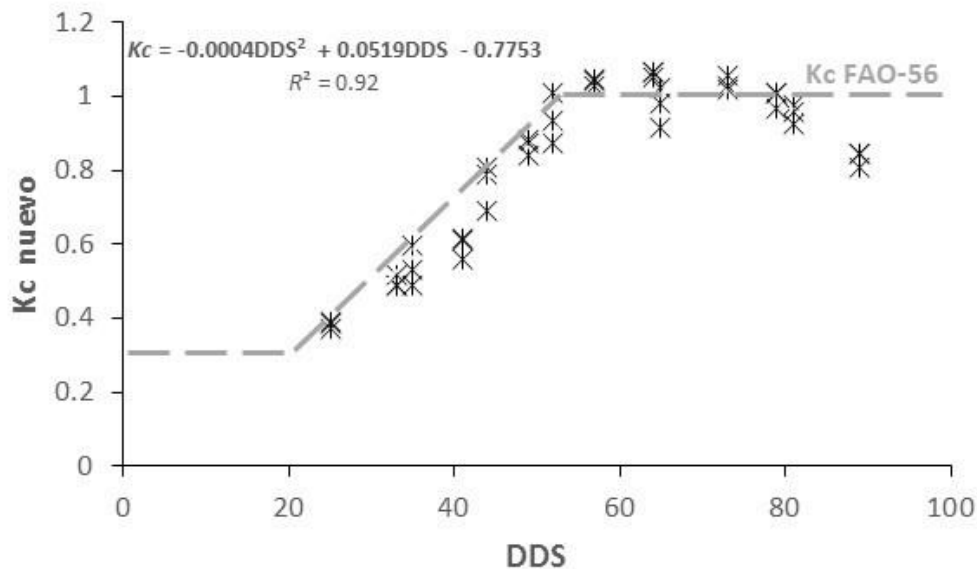


Figura 11. Curva de nuevo Kc comparado con el Kc FAO-56.

Comparación entre *ET_o* y *ET_c*

Los valores de *ET_o* se tomaron de la estación meteorológica del campo experimental La Laguna, localizado a 15 km del área de estudio, mientras que los valores de *ET_c* son resultado de multiplicar los valores nuevos de *K_c* por la *ET_o*. La Figura 12 indica la comparación de *ET_o* y *ET_c* para el ciclo 2017-2018. Al inicio del ciclo (1-20 DDS), los valores de *ET_o* fueron alrededor de 2 mm día⁻¹, mientras que para la *ET_c* fueron 0.23 mm día⁻¹. En la etapa de desarrollo (21-57 DDS), los valores de *ET_o* fluctuaron en 2.5 mm día⁻¹ y los valores de *ET_c* fueron de 0.3 a 2.5 mm día⁻¹. En la etapa de madurez (58 a 85 DDS), los valores entre *ET_o* y *ET_c* fueron similares (3.5 mm día⁻¹). Al final del ciclo (86-95 DDS), la *ET_o* se mantuvo en 4.5 mm día⁻¹ y la *ET_c* disminuyó a 3.0 mm día⁻¹. En general, la figura ratifica que, a principios del ciclo de cultivo, la *ET_o* diaria fue mayor a la *ET_c* y a mediados de ciclo los valores fueron similares; esto indica que con la *ET_c*, la demanda hídrica del cultivo es acorde con las etapas fenológicas del cultivo. Valores de *ET_o* mayores (6.0 mm día⁻¹) a los encontrados en el estudio realizado por los autores fueron reportados por Lovelli *et al.* (2007) y Kar *et al.* (2007). Sin embargo, la *ET_o* de diferentes variedades de cártamo, bajo diferentes condiciones de clima y suelo pueden variar de 200 a 1 000 mm por ciclo (Istanbulluoglu, 2009).

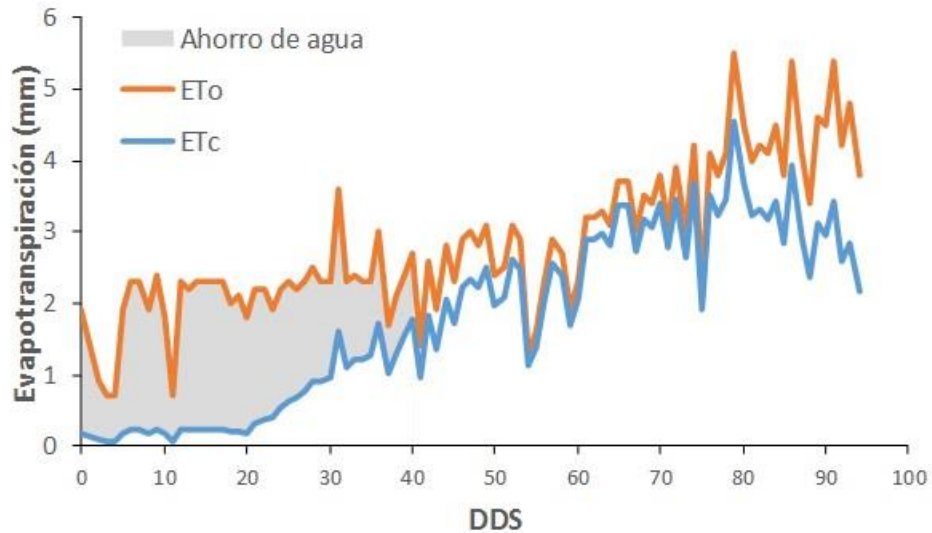


Figura 12. Comparación de ETo y ETc en el ciclo 2017-2018.

Entendiendo las diferentes etapas de desarrollo del cultivo y aplicando la cantidad exacta de volumen de agua, los productores podrán mejorar el calendario de riego, el manejo del agua e incrementar la sustentabilidad del recurso hídrico en los cultivos. Reyes-González *et al.* (2016) informaron que los agricultores deberían usar la ETc en lugar de la ETo para la programación de los riegos en regiones áridas y semiáridas donde el agua es escasa.

Conclusiones

Los valores de NDVI y de altura fueron afectados por la calendarización de los riegos y por la precipitación recibida durante las dos estaciones de crecimiento. Por otro lado, la relación entre el $NDVI_{campo}$ y el Kc de FAO-56 fue buena, aunque en el segundo ciclo de crecimiento bajo, a consecuencia de la mala programación de los riegos y la distribución de la lluvia, pues los Kc de la FAO se desarrollaron para cultivos sin restricciones de humedad.

La ecuación generada entre $NDVI_{campo}$ y Kc FAO-56 para ambos ciclos de cultivo se utilizó para desarrollar nuevos valores de Kc para cártamo forrajero. Ello significó que los índices de vegetación son una herramienta útil para generar Kc en el nivel local. Los valores nuevos de Kc obtenidos provocarán que se aplique el agua de acuerdo con las diferentes etapas fenológicas y/o requerimientos hídricos del cultivo, ayudando a mejorar la programación del riego y haciendo más eficiente el uso del agua en la agricultura.

Referencias

- Adamala, E., Rajwade, Y. A., & Reddy, Y. V. K. (2016). Estimation of wheat crop evapotranspiration using NDVI vegetation index. *Journal of Applied and Natural Science*, 8(1), 159-166.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Rome, Italy: FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 380-394.
- Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A., & Kustas, W. P. (2012). Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122, 50-65. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>
- Arslan, Y., & Bayraktar, N. (2015). Effect of different levels of nitrogen and phosphorous on some yield component of safflower (*Carthamus tinctorious* L.) in dry conditions. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayati Bilimleri Dergisi*, 1(2), 94-103.
- Bagheri, H., Saeedi, R., & Zaeh, E. (2006). Evaluation of agronomic traits of selected genotypes from safflower mass native in the spring and summer planting. *Agricultural Technology and Science and Natural Resources*, 10, 375-390.
- Bausch, W. C., & Neale, C. M. U. (1987). Crop coefficients derived from reflect canopy radiation: A concept. *Transactions of ASAE*, 30(3), 703-709.
- Bausch, W. C. (1993). Soil background effects in reflectance-based crop coefficient for corn. *Remote Sensing of Environment*, 46, 213-222.
- Bonfim-Silva, E. M., Paludo, J. T. S., Sousa, J. V. R., De Freitas-Sousa, H. H., & Da Silva, T. J. A. (2015). Development of safflower subjected to nitrogen rates in cerrado soil. *American Journal of Plant*

Sciences, 6(13), 2136-2143. Recuperado de
<http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.613215>

- Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbontín, C., & Gonzalez-Piqueiras J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficient for irrigated grapes (*Vitis vinífera* L.). *Agricultural Water Management*, 98, 45-54.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.
- Consoli, S., Russo, A., & Snyder, R. (2006). Estimating evapotranspiration of orange orchards using surface renewal and remote sensing techniques. In: Urso, G. D., Osann-Jochum, M. A., & Moreno, J. (eds.). *Earth observation for vegetation monitoring and water management* (pp. 185-192). Maryland, USA: American Institute of Physics.
- Dajue, L., & Mundel, H. H. (1996). *Safflower*. *Carthamus tinctorius* L. *Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*. 7. Rome, Italy: Institute of plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetics Resources Institute.
- Dobrin, A., & Marin, D. I. (2015). Research on safflower (*Carthamus tinctorios* L.) crop in the conditions of southeastern Romania. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 58, 181-184.

- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No 24*. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki S. Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J. C. B., Kharrou, M. H., Khabba, S., Mougnot, B., Olioso, A., Rodríguez, J. C., & Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation índices. *Agricultural Water Management*, 79(1), 1-27.
- Dwiedi, S. L., Upadhyaya, H. D., & Hegde, D. M. (2005). Development of core collection in safflower (*Carthamus tinctorius L.*) germplasm. *Genetics Resources and Crop Evolution*, 52, 821-830. DOI: 10.1007/s10722-003-6111-8
- French, A. C., Hunsaker, D. J., & Thorp, K. R. (2015). Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance model. *Remote Sensing of Environment*, 158, 281-294.
- Gontia, N. K., & Tiwari, K. N. (2010). Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum estivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water Resource Management*, 24, 1399-1414.
- Garatuza-Payán, J., Tamayo, A., Watts, C., & Rodríguez, J. V. (2003). Estimation large area wheat evapotranspiration from remote sensing data. *Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IEEE International, Toulouse, France.*

- González-Dugo, M. P., & Mateos, L. (2008). Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigation cotton and sugar beet crops. *Agricultural Water Management*, 95, 48-58.
- Hajare, T. N., Patil, N. G., & Verma, K. S. (2008). On spectral indices as a function of soil variability in safflower crop. *Journal of Indian Society Remote Sensing*, 36, 267-272.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environment*, 25, 295-309.
- Irmak, A., Ratcliffe, I., Ranade, P., Hubbard, K. G., Singh, R. K., Kamble, B., & Kjaersgaard, J. (2011). Estimation of land surface evapotranspiration with a satellite remote sensing procedure. *Great Plains Research*, 21, 73-88.
- Istanbulluoglu, A. (2009). Effect of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius L.*) under Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 96, 1792-1798.
- Jalali, A. H., Salehi, F., & Bahrani, M. J. (2011). Effects of different irrigations intervals and weed control on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius L.*). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 1261-1269. DOI: 10.1080/03650340.2011.587805
- Jayanthi, H., Neale, C. M. U., & Wright, J. L. (2007). Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 235-246.

- Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, 5(4), 1588-1602.
- Kar, G., Kumar, A., & Martha, M. (2007). Water use efficiency and crop coefficient of dry season oilseed crops. *Agricultural Water Management*, 87, 73-82.
- Kizil, S., Cakmak, O., Kirici, S., & Inan, M. (2008). A comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 22(4), 947-953.
- Kukal, M., Irmak, S., & Kilic, A. (2017). Long-term spatial and temporal maize and soybean evapotranspiration trends derived from ground-based and satellite-based dataset over the great plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 149(9), 04017031
- Kjaersgaard, J., & Allen, R. G. (2010). *Remote sensing technology to produce consumptive water use maps for the Nebraska Panhandle* (Technical Report 88). Lincoln, USA: University of Nebraska.
- Laike, S., Tilahun, K., & Hordofa, T. (2006). Crop coefficient of Haricot Bean at Melkassa, Central Rift Valley of Ethiopia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 107, 33-40.
- Lei, H., & Yang, D. (2014). Combining the crop coefficient of winter wheat and summer maize with remotely sensed vegetation index for estimating evapotranspiration in the North China Plain. *Journal of Hydrology Engineering*, 19, 243-251.

- Lovelli, S., Perniola, M., Ferrara, A., & Di Tommaso, T. (2007). Yield response factor to water (K_y) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. *Agricultural Water Management*, 92, 73-80.
- Mohammadi, M., Ghassemi-Golezani, K., Zehtab-Salmasi, S., & Nasrollahzaade, S. (2013). Assessment of some physiological traits in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *International Journal of Life Sciences*, 10(1), 58-64.
- Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L. A., & Espinosa-Espinosa, J. L. (2018). Evaluation of water use efficiency in irrigated agriculture supported by satellite images. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(1), 31-38.
- Reta S., D. G., Serrato, C. J. S., Gaytán, M. A., Quiroga, G. H. M., Orozco, H. G., & Payán, G. J. A. (2014). Potencial forrajero del cártamo en respuesta al distanciamiento entre surcos en la Comarca Lagunera. *Agrofaz*, 14(3), 65-71.
- Reta, S. D. G., Sánchez, D. J. I., Reyes, G. A., Ochoa, M. E., Chew M. I. Y., & Gaytán M. A. (2017). Evaluación semicomercial de cártamo forrajero en siembras tardías durante otoño-invierno en la Comarca Lagunera, México. *Agrofaz*, 17(1), 51-63.
- Reyes-González, A., Hay, C., Kjaersgaard, J., & Neale, C. M. U. (2015). Use of remote sensing to generate crop coefficient and estimate actual crop evapotranspiration. *2015 ASABE Annual International Meeting*, New Orleans, Louisiana, USA.

- Reyes-González, A., Trooien, T., Kjaersgaard, J., Hay, C., & Reta Sánchez D. G. (July, 2016). Development of crop coefficients using remote sensing-based vegetation index and growing degree days. In: *Proceedings of the ASABE Annual International Meeting*, Orlando, USA.
- Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., & Ahiablame, L. (2018). Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. *Advances in Meteorology*, 2018, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>
- Reyes-González, A., Reta, S. D. G., Sánchez, D. J. I., Ochoa, M. E., Rodríguez, H. K., & Preciado, R. P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones *in situ*. *Terra Latinoamericana*, 37, 279-290. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Rocha, J., Perdigão, A., Melo, R., & Henriques, C. (2012). *Remote sensing based crop coefficients for water management in agriculture*. Sustainable Development-Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management, Sime Curkovic (eds.), IntechOpen. DOI: 10.5772/48561
- Rouse, J. W. Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (December, 1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceeding of Third ERTS Symposium*, 1974, NASA SP-351, Washington, USA.
- Saruhan, G. N., Saglam, A., Demiralay, M., & Kadioğlu, A. (2012). Apoplastic and symplastic solute concentrations contribute to

- osmotic adjustment in bean genotypes during drought stress. *Turkish Journal Biology*, 36, 151-160. DOI: 10.3906/biy-1101-177
- Singh, R., & Irmak, A. (2009). Estimation of crop coefficient using satellite remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 135, 597-608.
- Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R., & Wright, J. L. (2005). Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 94-109.
- Tayebi, A., Afshari, H., Farahvash, F., Sinki, J. M., & Nezarat, S. (2012). Effect of drought stress and different planting dates on safflower yield and its components in Tabriz region. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 2(3), 445-453.
- Trout, T. J. (2008). Remote sensing of canopy cover in horticultural crops. *HortScience*, 43(2), 333-337.
- Vaghar, M. S., Shamsi, K., Kobraee, S. & Behrooz, R. (2014). The effect of planting row interval and plant density on the phenological traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) dryland conditions. *International Journal of Bioscience*, 4(12), 202-208.
- Wright, J. L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *ASCE Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(1), 57-74.
- Zhang, H., Anderson, R. G., & Wang, D. (2015). Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research*, 180, 143-154.