

Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones *in situ*

Estimation of evapotranspiration of forage corn supported with remote sensing and *in situ* measurements

Arturo Reyes González^{1‡}, David G. Reta Sánchez¹, Juan I. Sánchez Duarte¹, Esmeralda Ochoa Martínez¹, Karla Rodríguez Hernández¹ y Pablo Preciado Rangel²

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Blvd. José Santos Valdez No. 1200 pte. Col. Centro. 27440 Matamoros, Coah., México.

[‡] Autor para correspondencia (reyes.arturo@inifap.gob.mx)

² Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Anna. 27170 Torreón, Coahuila, México.

RESUMEN

La agricultura bajo riego requiere de mejores estimaciones de la demanda hídrica de los cultivos. El objetivo del presente estudio fue estimar la evapotranspiración real (ETc) en maíz (*Zea mays* L.) forrajero mediante índices de vegetación obtenidos *in situ* y estimados con sensores remotos en la Comarca Lagunera, México. La investigación se realizó en 2011 y 2012 en cuatro parcelas de 900 m² irrigadas con el sistema de riego por goteo subsuperficial. Se determinó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el coeficiente de cultivo (Kc) ajustado durante el desarrollo del cultivo. Los valores iniciales, máximos y finales de NDVI fueron 0.13, 0.79 y 0.63 con ambos métodos y en ambos ciclos. Los valores máximos ajustados de Kc se obtuvieron a los 54 y 48 días después de la siembra (DDS) *in situ* con el GreenSeeker, y a los 61 y 59 DDS con las imágenes satelitales en 2011 y 2012, respectivamente. Los resultados mostraron buena relación entre la ETc estimada *in situ* y estimada con sensores remotos ($r^2 = 0.98$) para ambos años. Aunque la variación de ETc con ambos métodos fue de 1.2 mm día⁻¹ al inicio del ciclo y 7.4 mm día⁻¹ al inicio de floración-grano lechoso. Con el uso de sensores remotos se estimaron las necesidades hídricas del maíz forrajero con precisión similar a la obtenida con mediciones *in situ*; por lo que ambos métodos pueden utilizarse para mejorar la programación del riego y preservar el recurso hídrico en la agricultura.

Palabras clave: *coeficiente de cultivo, GreenSeeker, imágenes satelitales, índice de vegetación.*

SUMMARY

Irrigated agriculture requires better estimates of crop water demand. The aim of this study was to estimate the evapotranspiration (ETc) in forage corn through vegetation indices obtained *in situ* and estimated with remote sensing in the Comarca Lagunera, Mexico. The research was carried out in 2011 and 2012 in four 900 m² plots irrigated with a subsurface drip irrigation system. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and crop coefficient (Kc) during crop development were determined. The initial, maximum and final NDVI values were 0.13, 0.79 and 0.63 for both methods and in both cycles. The maximum Kc values were obtained 54 and 48 days after sowing (DDS) with GreenSeeker, and at 61 and 59 DDS with satellite images in 2011 and 2012, respectively. The results showed a good relationship between ETc estimated *in situ* and ETc estimated with remote sensing ($r = 0.98$) for both years. Although the variation of ETc using both methods was 1.2 mm day⁻¹, early in the cycle and 7.4 mm day⁻¹ to flowering start-milky grains. Water needs of forage corn were estimated with similar precision using remote sensing and *in situ* measurements. Therefore, both methods can be used to improve irrigation scheduling and preserve water resources in agriculture.

Cita recomendada:

Reyes González, A., D. G. Reta Sánchez, J. I. Sánchez Duarte, E. Ochoa Martínez, K. Rodríguez Hernández y P. Preciado Rangel. 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>

Recibido: 18 de enero de 2018.

Aceptado: 02 de abril de 2018.

Publicado en Terra Latinoamericana 37: 279-290.

Index words: *crop coefficient, GreenSeeker, satellite images, vegetation index.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura es el mayor usuario de agua en el mundo (Gontia y Tiwari, 2010). De hecho, el suministro inadecuado y la mala programación del riego en la producción de los cultivos hacen al recurso hídrico cada vez más escaso. Por lo que, una mejor estimación de las necesidades hídricas de los cultivos permitirá la gestión adecuada del riego y la conservación del agua para la agricultura. Un método común para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos es mediante la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c) (Allen *et al.*, 1998, 2005).

La evapotranspiración (ET), que incluye la transpiración de las plantas y la evaporación de agua de la superficie del suelo o del agua libre interceptada por el follaje, es una determinación que continúa siendo la de mayor importancia en la agricultura con riego (Allen *et al.*, 1998). La ET es afectada por diversos factores atmosféricos tales como: temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Además, la ET varía regional y estacionalmente de acuerdo con las condiciones de clima, suelo, y vegetación (Jensen y Allen, 2016). Al estimar las variaciones de ET, los técnicos pueden planear y manejar eficientemente el uso de los recursos hídricos en zonas de agricultura, especialmente en regiones áridas y semiáridas del país donde el agua es la principal limitante para la producción agrícola.

En los últimos años, el uso de sensores remotos (instrumentos capaces de obtener información de un objeto sin estar en contacto físico con el objeto) o imágenes satelitales con resolución moderada (LandSat, SPOT, AVHRR) se han convertido en una herramienta básica para estimar el uso del agua por los cultivos en la agricultura. Con esta tecnología, la ET de los cultivos es calculada con base en la ecuación de balance de energía, donde se resta el flujo de calor latente (G) y el flujo del calor sensible (H) de la radiación neta (R_n) (Allen *et al.*, 2007). También con la ayuda de imágenes multiespectrales obtenidas de sensores remotos montados en satélites se pueden estimar índices de vegetación. Los índices de vegetación tal como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), han sido utilizados para estimar el K_c, monitorear la vegetación, predecir los rendimientos y

estimar el consumo de agua en los cultivos (Sellers, 1985; Garatuza-Payan y Watts, 2005; Glenn *et al.*, 2011; El-Shirbeny *et al.*, 2014; Reyes-González *et al.*, 2018). El NDVI capta el contraste de la reflectancia de la luz a partir de las hojas verdes entre las longitudes de onda del rojo (R) y el infrarrojo cercano (IRC). La luz roja está fuertemente absorbida por la clorofila de las hojas de las capas superiores del follaje, mientras que el infrarrojo cercano es transmitido, reflejado y dispersado por la estructura del mesófilo de la hoja, penetrando hasta el fondo del follaje e interactuando con múltiples capas de las hojas (Glenn *et al.*, 2011; Balbontín *et al.*, 2016).

Estudios han mostrado altas correlaciones entre NDVI y características biofísicas de la planta. Heilman *et al.* (1982), indicaron la posibilidad de usar la reflectancia derivada del Índice de Vegetación Perpendicular (IVP) para describir el crecimiento del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Neale *et al.* (1989) demostraron la relación entre el K_c del cultivo de maíz y la diferencia normalizada (ND) obtenido de un radiómetro de tres bandas. Por su parte Husanker *et al.* (2003) indicaron una relación lineal entre NDVI y K_c para el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.). Estas relaciones han sido estudiadas para diferentes cultivos en todo el mundo, incluyendo maíz (Bausch, 1995), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Garatuza-Payan *et al.*, 2003), alfalfa (Wright, 1982), sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) (Singh e Irmak, 2009), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (González-Dugo y Mateos, 2008), uva (*Vitis vinifera* L.) (Campos *et al.*, 2010), frijol (*Phaseolus vulgaris* L., S_p, P_L) (Laike *et al.*, 2006), nogal (*Carya illinoensis* Wangenh., K. Koch) (Samani *et al.*, 2009) y cebolla (*Allium cepa* L.) (Trout *et al.*, 2008). Sin embargo, la relación entre NDVI proveniente de sensores remotos y de GreenSeeker (equipo para medir el NDVI de los cultivos *in situ*) con el K_c, tomado de FAO-56, para estimar la ET_c en maíz forrajero en la Comarca Lagunera no se han discutido.

Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación fue estimar la evapotranspiración real en maíz forrajero, mediante índices de vegetación obtenidos con sensores remotos y mediciones *in situ* con el equipo GreenSeeker, para las condiciones de la Comarca Lagunera. La hipótesis planteada fue que los índices de vegetación provenientes de mediciones *in situ* y sensores remotos permiten estimar con precisión similar la evapotranspiración real en maíz forrajero con riego presurizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en el Campo Experimental La Laguna del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Matamoros Coahuila, México (25° 32' N, 103° 14' O, altitud de 1100 m y clima muy seco semicálido (Bwh), con humedad atmosférica escasa, temperatura media anual de 22.6 °C, precipitación promedio de 215.5 mm y evaporación media de anual de 2000 mm (Figura 1) (Villa *et al.*, 2005).

La investigación se realizó durante los ciclos de crecimiento 2011 y 2012. Se establecieron cuatro parcelas de 30 m de largo por 30 m de ancho, con 40 surcos en cada una de ellas. Los surcos se orientaron de norte a sur, con distancia entre ellos de 0.76 m y seis plantas por metro lineal (80 000 plantas ha⁻¹). La siembra se realizó en seco el 21 de abril de 2011 (ciclo primavera) y el 13 de julio de 2012 (ciclo verano), con la variedad de maíz Arrayan (ABT) de ciclo intermedio (~105 días) y tolerante a altas temperaturas. La dosis de fertilización fue dosificada a través del riego de acuerdo al crecimiento fenológico del cultivo aplicando una dosis total de 200-100-00 (N, P₂O₅, K₂O).

El sistema de riego utilizado fue por goteo subsuperficial (RGS). La cintilla utilizada fue la RO DRIP 8 mil (Rivulis Irrigation Inc., San Diego, CA, EUA) con espesor de pared de 0.200 mm y diámetro interior de 16 mm, con emisores a 0.2 m y un caudal de 0.5 L h⁻¹ por emisor. La cintilla fue enterrada a 0.3 m de profundidad, con distancia entre ellas de 0.76 m. El riego se aplicó cada tercer día, aplicando 100% de ETo, multiplicado por un Kc correspondiente a cada etapa fenológica (inicio, desarrollo, madurez y senescencia). La ETo se tomó de la estación agroclimatológica del Campo Experimental la Laguna, la cual se encuentra ubicada a 10 m del cultivo en estudio. La ecuación que utiliza esta estación para calcular ETo es la propuesta por Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) (1):

$$\lambda ETo = \frac{\Delta(R_n - G) + P_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(I + \frac{r_s}{r_a})} r \quad (1)$$

donde:

λ = calor latente de evaporización (MJ kg⁻¹),

ETo = evapotranspiración de referencia (pasto) (mm día⁻¹),

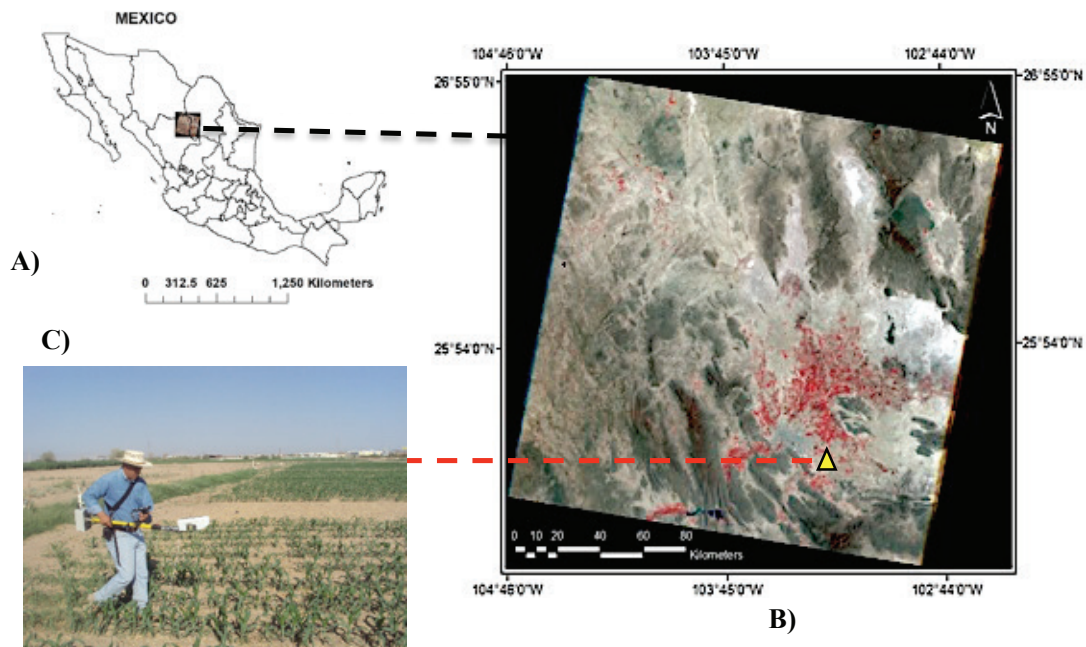


Figura 1. Ubicación del área de estudio (A); imagen satelital Landsat 8 infrarrojo (5,4,3) (path 30, row 42) (B); mediciones in situ de NDVI con el equipo GreenSeeker (C).
Figure 1. Location of the study area (A); infrared Landsat 8 satellite image (5,4,3) (path 30, row 42) (B); On-site measurements of NDVI with the GreenSeeker team (C).

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

R_n = radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$),

G = flujo del calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$),

P_a = densidad media del aire a presión constante (kg m^{-3}),

C_p = calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),

$(e_s - e_a)$ = déficit de presión del vapor (kPa),

γ = constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),

r_s y r_a = resistencia superficial y aerodinámica (s m^{-1}).

El NDVI *in situ* se empezó a medir a los 12 y 14 días después de la siembra (DDS) en 2011 y 2012 respectivamente, con intervalo de siete días, a una altura de 0.8 m sobre el dosel (Figura 1C). Se realizaron cuatro mediciones por día por parcela a lo largo de los surcos elegidos durante el ciclo del cultivo. Las mediciones se realizaron por la mañana (10:00 a.m.). El promedio de las cuatro parcelas se comparó con el NDVI obtenido de los sensores remotos. Las mediciones se realizaron con el equipo GreenSeeker, el cual fue 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 (660 nm), así como uno de infrarrojo cercano (780 nm) al dosel del cultivo. El campo de visión es un ovalo que va de 25 a 50 cm dependiendo de la altura a la que se encuentre el GreenSeeker respecto al dosel del cultivo. El NDVI es calculado utilizando la reflectancia espectral de la banda visible e infrarrojo cercano usando la siguiente Ecuación (2) (Rouse *et al.*, 1974).

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (2)$$

donde: IRC y R son reflectancias en la longitud de onda del infrarrojo cercano y rojo, respectivamente.

Referente a los sensores remotos, las imágenes de satélite utilizadas se capturaron durante el crecimiento del cultivo del 25 de abril al 14 de julio en 2011 y del 24 de julio al 12 de octubre en 2012, con los satélites Landsat 5 y Landsat 7 TM (*Thematic Mapper*) (path = 30, row = 42). En 2011 se utilizaron ocho imágenes y en 2012 se utilizaron cinco. Las imágenes se examinaron visualmente, asignando a cada imagen un índice de claridad entre 0 y 1, donde 0 es una imagen llena de nubes e inutilizable y 1 es una imagen libre de nubes. Los índices de claridad para cada imagen se muestran en el Cuadro 1. Para el estudio se usaron imágenes con índice de claridad mayor o igual a 0.8.

Las imágenes satelitales se procesaron con el programa ERDAS IMAGINE (Hexagon Geospatial Co., Madison, AL, EUA) versión 9.0, donde se calibraron los números digitales, primero a radiancia y luego a reflectancia con las siguientes Ecuaciones (3) y (4):

Radiancia:

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_\lambda \quad (3)$$

donde:

L_λ = radiación espectral de la banda de interés,

$LMAX_\lambda$: máxima radiación de la banda,

$LMIN_\lambda$: mínima radiación de la banda,

Q_{calmax} : nivel digital máximo calibrado (255),

Q_{calmin} : nivel digital mínimo calibrado (1),

Q_{cal} : número digital para cada pixel.

Reflectancia:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \times L_\lambda \times d^2}{ESUN_\lambda \times \cos\theta_s} \quad (4)$$

Cuadro 1. Índices de claridad para las diferentes imágenes de satélite utilizadas en el estudio.

Table 1. Clarity index for the different satellite images used in the study.

| Fecha imagen | DDS | # Landsat | Índice de claridad |
|--------------|-----|-----------|--------------------|
| 2011 | | | |
| 25/4 | 5 | 5 | 1 |
| 19/5 | 29 | 7 | 1 |
| 27/5 | 37 | 5 | 1 |
| 4/6 | 45 | 7 | 1 |
| 20/6 | 61 | 7 | 1 |
| 28/6 | 69 | 5 | 0.95 |
| 6/7 | 77 | 7 | 0.9 |
| 14/7 | 85 | 5 | 0.85 |
| 2012 | | | |
| 24/7 | 12 | 7 | 0.85 |
| 9/8 | 28 | 7 | 0.8 |
| 25/8 | 44 | 7 | 0.9 |
| 10/9 | 60 | 7 | 0.9 |
| 12/10 | 92 | 7 | 0.8 |

DDS = días después de la siembra.

DDS = days after planting.

donde:

ρ_{λ} : reflectancia de la banda de interés,

π : 3.1416,

L_{λ} : radiación espectral de la banda de interés,

d^2 : distancia entre la tierra y el sol,

$ESUN_{\lambda}$: irradiación solar en la banda de interés,

$COS\theta_s$: coseno del ángulo de incidencia solar (de nadir) (ángulo cenital = 90 – ángulo de elevación).

El NDVI se calculó con la reflectancia de las bandas 3 y 4 (rojo e infrarrojo cercano) para cada una de las imágenes. Para evitar problemas de mezcla de píxeles, se utilizó el pixel ubicado en el centro del experimento.

Finalmente, se estableció una regresión lineal entre el NDVI derivado de las imágenes de satélite y el NDVI del GreenSeeker con el Kc tomado del manual FAO-56 para un sistema de riego presurizado y basado en la referencia de un pasto (Allen *et al.*, 1998). La ecuación lineal obtenida se usó para estimar el Kc como una función del NDVI para ambos años en estudio. Los valores de Kc se multiplicaron por ETo y se generó ETc.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición *in situ* de NDVI con el GreenSeeker

La curva de NDVI muestra la misma tendencia a través de la estación de crecimiento para ambos años (Figura 2). Se observó un incremento de NDVI desde la etapa inicial (V3) a la etapa de madurez (inicio floración-grano lechoso (VT-R3)) empezando a los 12

y 14 DDS y terminando a 54 y 48 DDS en 2011 y 2012, respectivamente. En el periodo de inicio de desarrollo hasta madurez se presentaron las mayores desviaciones estándar (± 0.05) en 2011 y (± 0.048) en 2012. En esta etapa la biomasa se incrementó rápidamente resultando en un aumento de NDVI y una mayor cobertura vegetal. Los valores máximos de NDVI (0.79 y 0.80) fueron a 54 y 48 DDS en 2011 y 2012, respectivamente. La diferencia entre valores máximos de NDVI se debió a las temperaturas medias alcanzadas durante la etapa de desarrollo, registrándose 25.84 y 27.24 °C en abril y mayo de 2011; y 27.79 y 28.78 °C en julio y agosto de 2012 y a la acumulación de unidades calor (UC) 878 en 2011 y 909 en 2012. Debido a las altas temperaturas medias durante el segundo ciclo de crecimiento (Figura 3) y a la acumulación de calor; el ciclo fue menor. Una vez alcanzado el valor máximo de NDVI, los valores empezaron a descender ligeramente, indicando la senescencia del cultivo.

Los resultados de esta investigación fueron similares a los obtenidos en maíz en varios estudios con variaciones de la edad del cultivo cuando alcanzaron los máximos valores de NDVI, debido a diferencias en condiciones de clima y métodos de riego respecto a las ocurridas en la Comarca Lagunera. Hong *et al.* (2007) observaron valores máximos de NDVI de 0.79 y 0.81 con el GreenSeeker en el cultivo de maíz durante dos años. Thomason *et al.* (2007) reportaron valores máximos de NDVI de 0.80 en la etapa vegetativa (V15), la cual fue alcanzada a 56 DDS, mientras que Romano *et al.* (2011) obtuvieron los mayores valores de

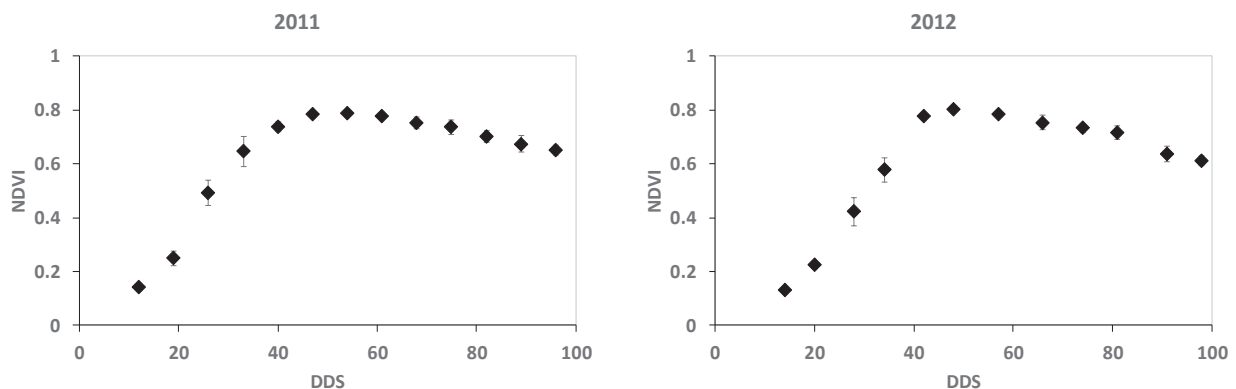


Figura 2. Progresión de NDVI medido *in situ* con GreenSeeker en maíz forrajero en 2011 y 2012 en la Comarca Lagunera, México.

Figure 2. Progression of NDVI measured *in situ* with GreenSeeker in forage maize in 2011 and 2012 in the Comarca Lagunera, Mexico.

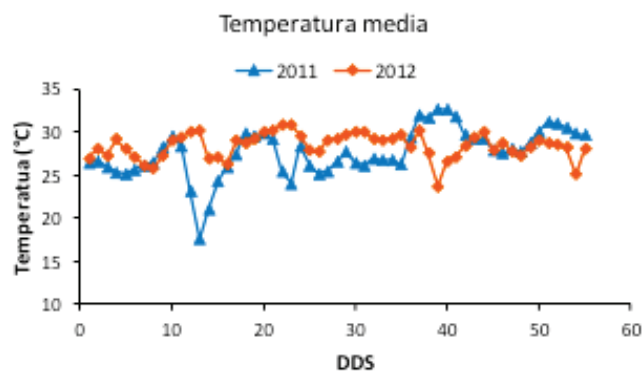


Figura 3. Temperatura media durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo (0-55 DDS) en los ciclos 2011 y 2012.

Figure 3. Average temperature during the first stages of crop development (0-55 DDS) in the 2011 and 2012 cycles.

NDVI en la etapa de pre-antesis (0.79), la cual empezó a 69 y terminó a 79 DDS. Por lo tanto, los valores de NDVI obtenidos en esta investigación fueron un buen indicador del estado actual de la planta, lo que representa una predicción confiable del coeficiente de cultivo basado en índice de vegetación para maíz forrajero en la Comarca Lagunera.

Estimación de NDVI con Sensores Remotos

Las curvas de NDVI obtenidas de sensores remotos se caracterizaron por presentar tres etapas de desarrollo (inicio-desarrollo, madurez y senescencia). Las curvas

de NDVI generadas con los sensores remotos mostraron la misma tendencia para ambos años en estudio (Figura 4). Progresiones similares de NDVI fueron reportadas por Reyes-González *et al.* (2018) en maíz forrajero durante cuatro estaciones de crecimiento al norte de México.

El valor inicial de NDVI fue 0.13 para ambos años. Los valores máximos alcanzados en la etapa de madurez (VT) en 2011 fue 0.73 (61 DDS) y en 2012 fue 0.76 (59 DDS). La etapa de madurez presentó la máxima cobertura vegetal por el cultivo; sin embargo, los valores máximos de NDVI estimados con el satélite fueron menores a los medidos *in situ*, esto debido a que las mediciones *in situ* fueron realizadas semanalmente, mientras que con el satélite Landsat la frecuencia fue quincenal (16 días), por lo que en *in situ* se capturaron los valores de NDVI con mayor exactitud de acuerdo a la etapa fenológica en la que se encontraba el cultivo. Otra razón puede ser que las mediciones *in situ* son directamente al dosel del cultivo y con el satélite los valores de NDVI son de un área (pixel) de 30×30 m, midiendo cultivo y suelo desnudo (Reyes-González, 2017¹). En la última etapa de desarrollo fenológico del maíz, cuando en el cultivo empieza la senescencia los valores de NDVI decrecen ligeramente hasta el final de la estación de crecimiento o época de cosecha (grano a $\frac{1}{3}$ de línea de leche (R3)), registrando valores de 0.60 en 2011 y 0.62 en 2012. Los resultados de este estudio son similares a las curvas de NDVI reportadas en otras investigaciones realizadas en el cultivo de maíz

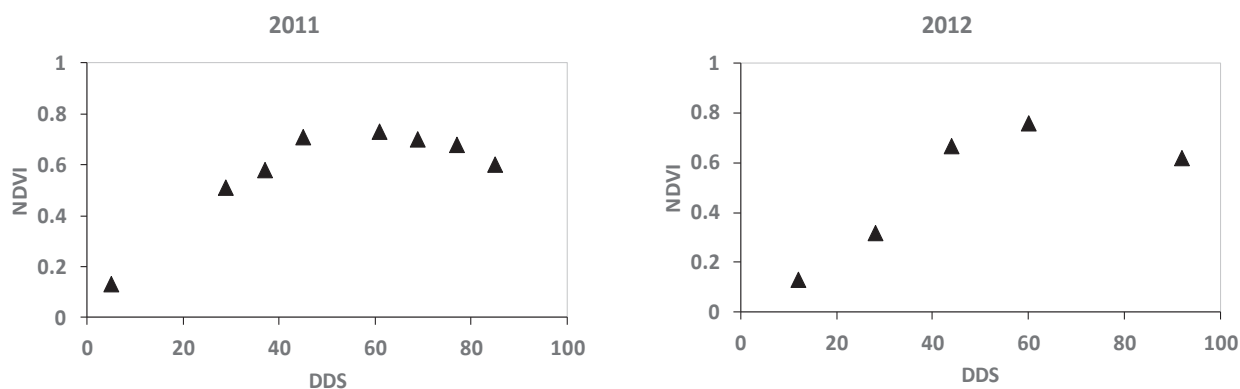


Figura 4. Progresión de NDVI estimado mediante imágenes de satélite en maíz forrajero en 2011 y 2012 en la Comarca Lagunera, México.

Figure 4. Progression of NDVI estimated by satellite images in forage corn in 2011 and 2012 in the Comarca Lagunera, Mexico.

¹ Reyes-González, A. 2017. Using remote sensing to estimate crop water use to improve irrigation water management. Electronic Theses and Dissertations. 1708. South Dakota State University. <https://openprairie.sdstate.edu/etd/1708>.

(Neale *et al.*, 1989; Bausch, 1993; Jackson *et al.*, 2004; Bushong *et al.*, 2014), las cuales mostraron diferentes etapas fenológicas del cultivo (desarrollo, madurez y senescencia). Las curvas de los índices de vegetación como el NDVI pueden variar de acuerdo con la cantidad de nitrógeno aplicado, cantidad de agua suministrada, prácticas de manejo y sobre todo a las condiciones climáticas de cada región (Allen *et al.*, 1998). Por ello es importante realizar estudios en diferentes regiones, para ajustar la información a las condiciones locales.

Curvas de Kc Generadas de los Índices de Vegetación Medidas *in situ* y Estimados con Sensores Remotos

Los modelos de regresión lineal fueron utilizados para estimar el Kc como función del NDVI para ambos métodos (Figura 5). Las curvas de Kc ajustado obtenidas *in situ* y estimados con los sensores remotos mostraron una misma tendencia, iniciando con un valor de ~ 0.2 , valor máximo de ~ 1.0 , y al final se reduce a un valor promedio de ~ 0.78 (Figura 6).

Por otro lado, y de acuerdo con los resultados de Kc ajustado obtenido *in situ*, el valor máximo de Kc se alcanzó a 54 DDS en 2011 y 48 DDS en 2012, mientras que para las imágenes de satélite fue a 61 DDS en 2011 y 59 DDS en 2012. La diferencia entre el máximo Kc alcanzado en ambos años se debió a las mayores temperaturas medias diarias y a las unidades calor acumuladas (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006) durante el segundo ciclo de crecimiento, el cual fue más cálido (Figura 3). Estas curvas de Kc fueron semejantes a las reportadas por Reyes-González *et al.* (2015), quienes generaron curvas de Kc para maíz utilizando el cultivo de alfalfa como referencia en la Región Lagunera. No obstante, estas curvas fueron diferentes a las reportadas por Allen *et al.* (1998), quienes reportaron etapas fenológicas más prolongadas en Utah, EUA, en comparación con las encontradas en este estudio debido principalmente a la acumulación de calor. Por consiguiente, y de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, en la agricultura con riego es de vital importancia generar curvas de Kc en condiciones

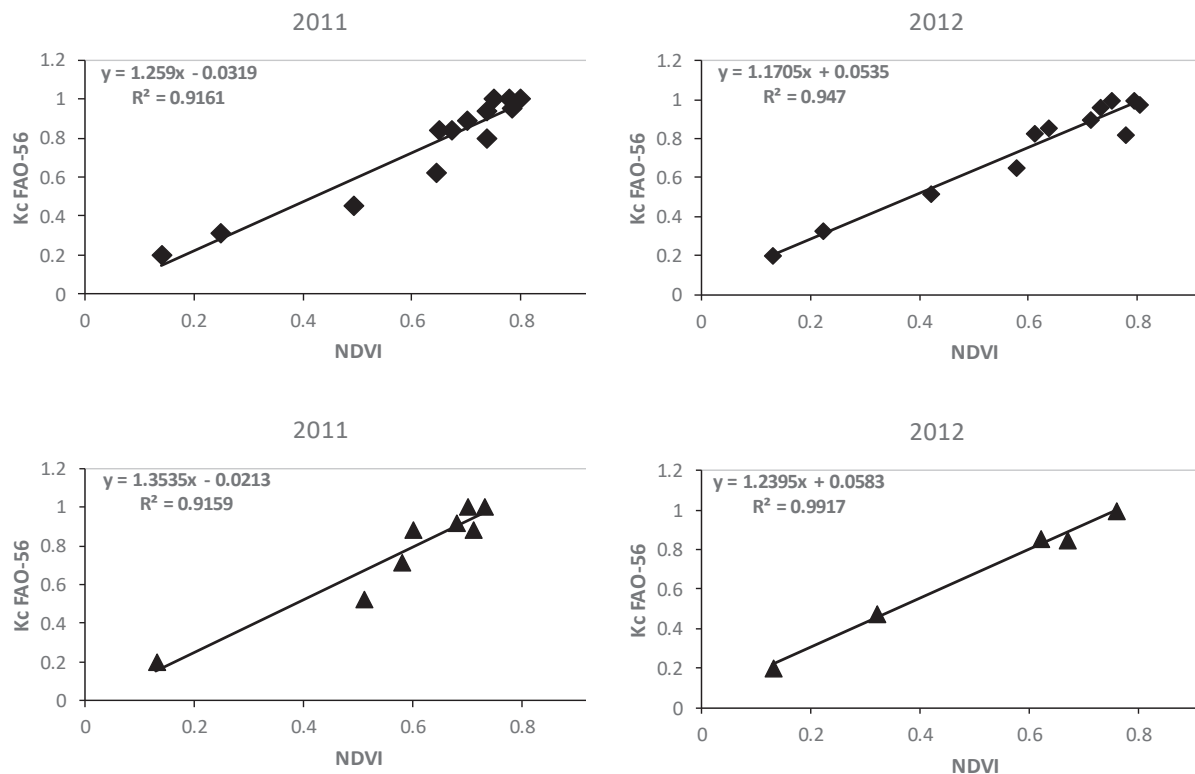


Figura 5. Regresión lineal entre NDVI obtenido *in situ* (arriba) e imágenes de satélite (abajo) y Kc obtenido del manual de la FAO-56 en maíz forrajero para 2011 y 2012.

Figure 5. Linear regression between NDVI obtained *in situ* (above) and satellite images (below) and Kc obtained from the FAO-56 manual on forage corn for 2011 and 2012.

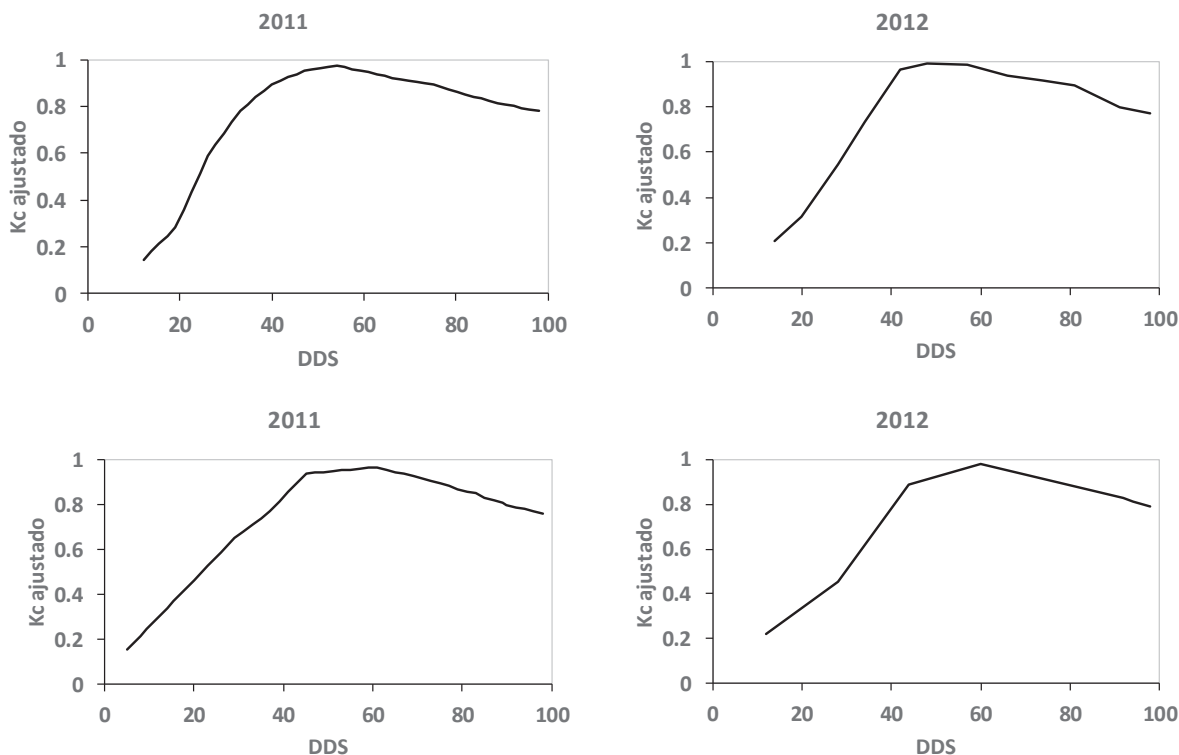


Figura 6. Curvas de coeficiente de cultivo (Kc) ajustado como una función de NDVI obtenido *in situ* (arriba) y de las imágenes de satélite (abajo) para ambos años en estudio.
Figure 6. Crop coefficient (Kc) curves adjusted as a function of NDVI obtained *in situ* (above) and satellite images (below) for both years under study.

locales como lo recomiendan Doorenbos y Pruitt (1977) y Allen *et al.* (1998).

Estimación de ETc con Valores de Índice de Vegetación Obtenidos *in situ* e Imágenes de Satélite

En 2011, los valores de ETc diarios estimados con los índices de vegetación obtenidos *in situ* fluctuaron de 1.05 a 7.31 mm día⁻¹, registrándose el primero el 25 de abril (5 DDS) y el segundo el 28 de junio (69 DDS). Los valores de ETc estimados con el satélite oscilaron entre 1.11 mm día⁻¹ y 7.40 mm día⁻¹ para las mismas fechas reportadas *in situ* (Cuadro 2).

En 2012, los valores de ETc diarios estimados *in situ* fueron de 1.20 a 6.17 mm día⁻¹, observados el 24 de julio (12 DDS) y el 25 de agosto (44 DDS), respectivamente; mientras que los estimados con el satélite fueron 1.27 y 5.88 mm día⁻¹ para las mismas fechas (Cuadro 2). En general, los valores bajos de ETc se encontraron al inicio, mientras que los valores altos se encontraron en la etapa de madurez.

Estas dos etapas de desarrollo se caracterizan porque en la primera, el cultivo requiere mínima cantidad de agua, ya que tiene menos follaje y por lo tanto demanda menos agua para cubrir la demanda atmosférica a través de la evapotranspiración; mientras que en la segunda etapa el cultivo tiene mayor follaje y por consecuencia demanda más cantidad de agua (mayor evapotranspiración) (Reyes-González *et al.*, 2018). La diferencia de evapotranspiración del cultivo entre lo estimado *in situ* y el satélite vario de -0.12 a 0.49 mm día⁻¹ en 2011 y de -0.13 a 0.56 mm día⁻¹ en 2012.

Si se considera una lámina total de riego de 70 cm (700 mm) y un ciclo intermedio de 105 días para maíz forrajero en la Comarca Lagunera (Faz *et al.*, 2000), la ETc total durante el ciclo se estaría subestimando con el satélite en 3.6% en 2011 y en 4.6% en 2012 con respecto a lo obtenido *in situ*, tomando en cuenta la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para ambos años y una ETc diaria promedio de 6.36 mm día⁻¹. Los porcentajes de error obtenidos en este estudio fueron menores a los reportados por Gowda *et al.* (2008),

Cuadro 2. ETc diaria, diferencia promedio y raíz del error cuadrático medio (RMSE) para maíz forrajero estimados *in situ* y con el satélite en 2011 y 2012 en la Comarca Lagunera, México.**Table 2. Daily ETc, average and root mean squared error (RMSE) for forage corn estimated *in situ* and with the satellite in 2011 and 2012 in the Comarca Lagunera, Mexico.**

| DDS | Kc | ETo | <i>In situ</i> (I) | Satélite (S) | Diferencia (I contra S) |
|----------------------------------|------|-----|--------------------|--------------|----------------------------|
| 2011 | | | | | |
| ----- mm día ⁻¹ ----- | | | | | |
| 5 | 0.15 | 7.2 | 1.05 | 1.11 | -0.06 |
| 29 | 0.67 | 6.0 | 3.53 | 3.42 | 0.11 |
| 37 | 0.76 | 6.4 | 5.73 | 5.24 | 0.49 |
| 45 | 0.94 | 6.9 | 6.58 | 6.69 | -0.11 |
| 61 | 0.97 | 6.5 | 6.16 | 6.28 | -0.12 |
| 69 | 0.93 | 8.0 | 7.31 | 7.40 | -0.09 |
| 77 | 0.90 | 7.3 | 6.54 | 6.27 | 0.27 |
| 85 | 0.79 | 5.3 | 4.51 | 4.29 | 0.22 |
| | | | | RMSE | 0.23 |
| 2012 | | | | | |
| 12 | 0.22 | 5.8 | 1.20 | 1.27 | -0.07 |
| 28 | 0.45 | 7.1 | 3.89 | 3.33 | 0.56 |
| 44 | 0.89 | 6.4 | 6.17 | 5.88 | 0.29 |
| 60 | 0.98 | 5.7 | 5.60 | 5.70 | -0.10 |
| 92 | 0.83 | 4.8 | 3.83 | 3.96 | -0.13 |
| | | | | RMSE | 0.29 |

DDS = días después de la siembra; Kc = coeficiente de cultivo; ETo = evapotranspiración de referencia; RMSE = raíz del error cuadrático medio.
 DDS = days after planting. Kc = crop coefficient; ETo = reference evapotranspiration. RMSE = root of the mean square error.

Chávez *et al.* (2008), Lei y Yang (2012) y Reyes-González *et al.* (2017¹), quienes encontraron valores entre 10 y 20% de error en la estimación de ET total. Aunque también se han encontrado porcentaje de errores similares (González-Dugo *et al.*, 2009; Irmak *et al.*, 2011) quienes reportaron porcentajes de 4.6 y 9 en la estimación de ET utilizando imágenes de satélite.

Relación de ETc Diaria entre los Valores Estimados *in situ* y los Estimados con las Imágenes de Satélite

Los coeficientes de determinación (r^2) para la ETc estimada fueron 0.98 en 2011 y 0.97 en 2012, mostrando buena relación en la estimación diaria de ETc (Figura 7). Las correlaciones de ETc presentaron interceptos de 0.0762 y 0.0346 y pendientes de 0.9973 y 0.9655 en 2011 y 2012, respectivamente, mostrando alta relación entre los valores medidos y observados

con 98% y 97% de confiabilidad. Los resultados fueron semejantes a los reportados en otros estudios (González-Dugo *et al.*, 2009; Lei y Yang, 2012), quienes encontraron fuertes relaciones de ET basados en NDVI estimados mediante sensores remotos y mediciones *in situ* en el cultivo de maíz. Sin embargo, en otras investigaciones, también se encontraron bajas correlaciones ($r^2 = 0.70$), tal es el caso de los reportados por Singh e Irmak, (2011), quienes compararon estimaciones de ET diarias con energía de balance de la Relación de Bowen (BR) *in situ*, y estimadas mediante imágenes de satélite procesadas con el modelo METRIC (Mapeo de la Evapotranspiración en alta Resolución y con Calibración Internalizada). Por lo tanto, los resultados obtenidos en esta investigación indican que la ETc puede ser estimada eficientemente usando índices de vegetación obtenidos *in situ* y de imágenes satelitales.

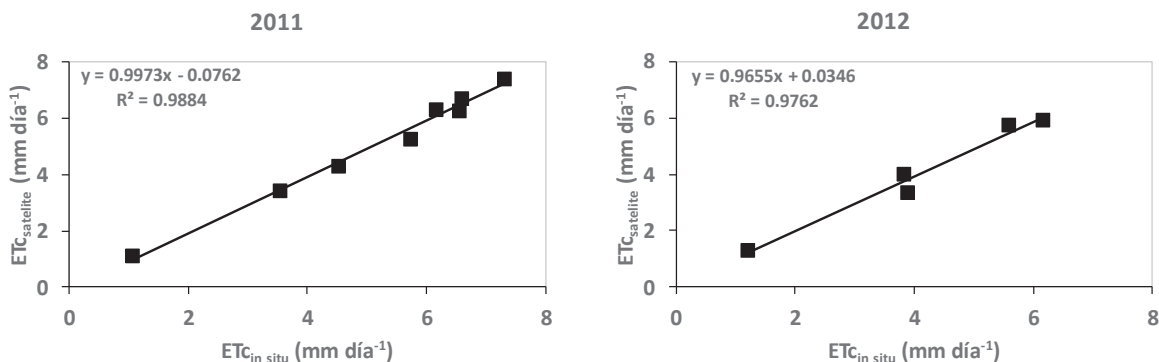


Figura 7. Relación de ETC diaria entre los valores estimados in situ y los estimados con el satélite durante la estación de crecimiento de maíz forrajero en 2011 y 2012.

Figure 7. Ratio of daily ETC between values estimated in situ and those estimated with satellite images during the 2011 and 2012 forage corn growing seasons.

CONCLUSIONES

Las curvas del coeficiente de cultivo (K_c) ajustado como una función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenidos *in situ* y estimados con sensores remotos mostraron una misma tendencia con valores de 0.2 a 1.0. Los valores máximos de K_c se obtuvieron a 54 y 48 días después de la siembra (DDS) *in situ* y a 61 y 59 DDS con los sensores remotos para el 2011 y 2012, respectivamente, siendo el segundo año el más cálido. Adicionalmente, los valores más bajos de ETC (± 1.2 mm día⁻¹) se presentaron al inicio del ciclo (V3), mientras que los valores más altos (± 7.4 mm día⁻¹) se presentaron en la etapa de madurez (VT-R3). Estos valores fueron estimados con alto grado de precisión ($r^2 = 0.98$ y 0.97) entre lo medido y lo estimado utilizando ambos métodos durante los dos años de estudio. Por lo tanto, las mediciones *in situ* y los sensores remotos pueden ser herramientas útiles para estimar con precisión la evapotranspiración real del maíz forrajero bajo riego, permitiendo incrementar la eficiencia en el uso y manejo del agua en este cultivo.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 300 p. ISBN 92-5-104219-5.
- Allen, R. G., I. A. Walter, R. Elliott, T. A. Howell, D. Itenfisu, and M. E. Jensen. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston, VA, USA. hdl:10013/epic.49050.d001.
- Allen, R. G., M. Tasumi, and R. Trezza. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133: 380-394.
- Balbontín, C., M. Odi, R. Poblete, J. Garrido, I. Campos y A. Calera. 2016. Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. Boletín INIA N° 335. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Intihuasi, La Serena, Chile. ISSN 0717-4829.
- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects in reflectance-based crop coefficient for corn. *Remote Sens. Environ.* 46: 213-222. doi: 10.1016/0034-4257(93)90096-G.
- Bausch, W. C. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manage.* 27: 55-68. doi: 10.1016/0378-3774(95)01125-3.
- Bushong, J. T., E. C. Miller, J. L. Mullock, D. B. Arnal, and W. R. Raun. 2014. Effect of irrigation and preplant nitrogen fertilizer source on maize in the Southern Great Plains. *Int. J. Agron.* ID247835. doi: 10.1155/2014/247835.
- Campos, I., C. M. U. Neale, A. Calera, C. Balbontín, and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficient for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98: 45-54. doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011.
- Chávez, J. L., C. M. U. Neale, J. H. Prueger, and W. P. Kustas. 2008. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. *Irrig. Sci.* 27: 67-81. doi: https://doi.org/10.1007/s00271-008-0122-3.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. Rome, Italy.
- El-Shirbeny, M. A., A. M. Ali, M. A. Badr, and E. M. Bauomy. 2014. Assessment of wheat crop coefficient using remote sensing techniques. *World Res. J. Agric. Sci.* 1: 012-016.
- Faz C., R., G. Núñez H. y A. Zavala G. 2000. Evaluación de híbridos precoces e intermedios de origen templado o tropical en condiciones restringidas de humedad en la Comarca Lagunera 2000. Informe de investigación del Ciclo Primavera 2000 CELALA-INIFAP-SAGAR. Celaya, Gto., México.

- Garatuza-Payan, J. and C. Watts. 2005. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrig. Drain. Sys.* 19: 301-320. doi: 10.1007/s10795-005-5192-2.
- Garatuza-Payan, J., A. Tamayo, C. Watts, and J. C. Rodríguez. 2003. Estimation large area wheat evapotranspiration from remote sensing data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium I*: pp. 380-382. doi: 10.1109/IGARSS.2003.1293782.
- Glenn, E. P., C. M. U. Neale, D. J. Husanker, and P. L. Nagler. 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystem. *Hidrol. Process.* 25: 4050-4062. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.8392>.
- Gontia, N. K. and K. N. Tiwari. 2010. Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water Res. Manage.* 24: 1399-1414. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9505-3>.
- González-Dugo, M. P. and L. Mateos. 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigation cotton and sugar beet crops. *Agric. Water Manage.* 95: 48-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.001>.
- González-Dugo M. P., C. M. U. Neale, L. Mateos, W. P. Kustas, J. H. Prueger, M. C. Anderson, and F. Li. 2009. A comparison of operational remote sensing-based model for estimating crop evapotranspiration. *Agric. For. Meteorol.* 149:1843-1853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>.
- Gowda, H. P., J. L. Chávez, T. A. Howell, T. H. Marek, and L. L. New. 2008. Surface energy balance based evapotranspiration mapping the Texas High Plains. *Sensors (Basel)* 8: 5186-5201. doi: 10.3390/s8085186.
- Heilman, J. L., W. E. Heilman, and D. G. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agron. J.* 6: 967-971. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400060010x>.
- Hong, S., J. S. Schepers, D. D. Francis, and M. R. Schlemmer. 2007. Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. *Soil Sci. Plant Anal.* 38: 2209-2226. doi: 10.1080/00103620701549157.
- Husanker, D. J., P. J. Pinter, E. M. Barnes, and B. A. Kimball. 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficient with a multispectral vegetation index. *Irrig. Sci.* 22: 95-104. doi: [doi: 10.1007/s00271-003-0074-6](https://doi.org/10.1007/s00271-003-0074-6).
- Irmak, A., I. Ratcliffe, P. Ranade, K. G. Hubbard, R. K. Singh, B. Kamble, and J. Kjaersgaard. 2011. Estimation of land surface evapotranspiration with a satellite remote sensing procedure. *Great Plains Res.* 21: 73-88.
- Jackson, T. J., D. Cheb, M. Cosh, F. Li, M. Anderson, C. Walthall, P. Doiaswamy, and E. R. Hunt. 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sens. Environ.* 92: 475-482. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.021>.
- Jensen, M. E. and R. G. Allen. 2016. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70*. American Society of Civil Engineers. New York, NY, USA. ISBN (PDF): 9780784479209.
- Laike, S., K. Tilahun, and T. Hordofa. 2006. Crop coefficient of Haricot Bean at Melkassa, Central Rift Valley of Ethiopia. *J. Agric. Rural Dev. Trop. Subtrop.* 107: 33-40.
- Lei, H. and D. Yang. 2012. Combining the crop coefficient of winter wheat and summer maize with remotely sensed vegetation index for estimating evapotranspiration in the North China Plain. *J. Hydrol. Eng.* 19: 243-251. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000765.
- Neale, C. M. U., W. C. Bausch, and D. F. Heerman. 1989. Development of reflectance-based crop coefficient for corn. *Transactions of the ASAE* 32: 1891-1899.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40: 13-25.
- Reyes-González, A., C. Hay, J. Kjaersgaard, and C. M. U. Neale. 2015. Use of remote sensing to generate crop coefficient and estimate actual crop evapotranspiration. 2015 ASABE Annual International Meeting. New Orleans, LA, USA. doi: 10.13031/aim.20152190105.
- Reyes-González, A., J. Kjaersgaard, T. Trooien, C. Hay, and L. Ahiablame. 2017. Comparative analysis of METRIC model and atmometer methods for estimating actual evapotranspiration. *Int. J. Agron.* 2017: 1-16. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3632501>.
- Reyes-González, A., J. Kjaersgaard, T. Trooien, C. Hay, and L. Ahiablame. 2018. Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. *Adv. Meteorol.* 2018: 1-12. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>.
- Romano, G., S. Zia-Khan, W. Spreer, C. Sanchez, J. Cairns, J. L. Araus, and J. Müller. 2011. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Comp. Electron. Agric.* 79: 67-74. doi: 10.1016/j.compag.2011.08.011.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. pp: 309-317. *In*: S. C. Fredeen, E. P. Mercanti, and M. A. Becker (eds). Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium- Volume I: Technical Presentations. NASA SP-351. NASA. Washington, DC, USA.
- Samani, Z., A. S. Bawazir, M. Bleiweiss, R. Skaggs, J. Longworth, V. D. Tran, and A. Pinon. 2009. Using remote sensing to evaluate the spatial variability of evapotranspiration and crop coefficient in the lower Rio Grande Valley, New Mexico. *Irrig. Sci.* 28: 93-100. doi: 10.1007/s00271-009-0178-8.
- Sellers, P. J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 6: 1335-1372. doi: <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>.
- Singh, R. K. and A. Irmak. 2009. Estimation of crop coefficient using satellite remote sensing. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135: 597-608. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000052.
- Singh, R. K. and A. Irmak. 2011. Treatment of anchor pixels in the METRIC model for improved estimation of sensible and latent heat fluxes. *Hydrol. Sci. J.* 56: 895-906. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.587424>.
- Thomason, W. E., S. B. Phillips, and F. D. Raymond. 2007. Defining useful limits for spectral reflectance measures in corn. *J. Plant Nutr.* 30: 1263-1277. doi: <https://doi.org/10.1080/01904160701555176>.

Trout, T. J., L. F. Johnson, and J. Gartung. 2008. Remote sensing of canopy cover in horticultural crops. *HortScience* 43: 333-337. doi: 10.21273/HORTSCI.43.2.333.

Villa Castorena, M. M., E. A. Catalán V. y M. A. Inzunza Ibarra. 2005. Análisis de la información climática para usos agrícolas. *Agrofaz* 5: 717-724.

Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *J. Irrig. Drain. Div.* 108: 57-74.