

Estimating the crop coefficient of forage maize using remote sensing

Estimación del coeficiente de cultivo del maíz forrajero por teledetección

Gerardo Delgado-Ramírez¹; Martín Alejandro Bolaños-González^{1*}; Abel Quevedo-Nolasco¹; Adolfo López-Pérez¹; Juan Estrada-Ávalos²

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA) del INIFAP. Margen Derecha Canal Sacramento km 6.5, Zona Industrial Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

*Corresponding author: martinb72@gmail.com, tel. 595 9570300.

Abstract

Introduction: The crop coefficient (K_c) methodology is used to estimate actual evapotranspiration. The basal crop coefficient (K_{cb}) represents the potential baseline of the K_c value, and its relationship with vegetation indices calculated with spectral information is the most widely used for its estimation.

Objective: The aim of this study was to estimate the K_{cb} of forage maize at plot level using spatially exhaustive and temporally dynamic radiometric information.

Methodology: NDVI and SAVI spectral indices were estimated in two study plots. K_{cb} was determined using nine algorithms: six based on NDVI and three based on SAVI. Their accuracy was evaluated by comparing it with the K_{cb} reported in the FAO-56 Manual. Accuracy was evaluated by comparing it with the K_{cb} reported in the FAO-56 Manual.

Results: The estimated K_{cb} values ranged from 0.13 to 1.12. They overestimated the FAO values at the initial stage and underestimated them at the final stage. The best evaluated algorithms were Campos K_{cbNDVI} , showing an average relative error (ARE) of 11.6 % in the whole vegetative cycle in Plot 1, and Argolo K_{cbNDVI} in Plot 2, with an ARE of 8.3 %.

Limitations of the study: This methodology should be tested under non-standard conditions, especially those that may stress the crop or with high moisture content in the topsoil.

Originality: The study showed that it is possible to estimate the K_{cb} of forage maize at plot level by non-invasive methods, dynamically, in a specific site and with quasi-real time monitoring of crop development.

Conclusions: This methodology was found to be suitable for estimating the K_{cb} of forage maize due to its accuracy, practicality and availability of information for large extensions of crops.

Keywords: *Zea mays*, satellite imagery, vegetation indices, evapotranspiration, FAO-56 Manual.

Resumen

Introducción: La metodología del coeficiente de cultivo (K_c) se utiliza para estimar la evapotranspiración real. El coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) representa la línea base potencial del valor de K_c , y su relación con índices de vegetación calculados con información espectral es la más usada para su estimación.

Objetivo: Estimar el K_{cb} del maíz forrajero a nivel parcela utilizando información de radiométrica, espacialmente exhaustiva y temporalmente dinámica.

Metodología: Se calcularon los índices espectrales NDVI y SAVI en dos parcelas de estudio. Se determinaron los K_{cb} mediante nueve algoritmos: seis en función del NDVI y tres del SAVI. Se evaluó su precisión al compararlo con el K_{cb} reportado en el Manual FAO-56.

Resultados: Los valores de K_{cb} estimados variaron de 0.13 a 1.12. De manera general, estos sobreestimaron los valores de la FAO en la etapa inicial y los subestimaron en la etapa final. Los algoritmos mejor evaluados fueron el de Campos K_{cbNDVI} , que presentó un error relativo promedio (ERP) de 11.6 % en todo el ciclo vegetativo en la Parcela 1, y el de Argolo K_{cbNDVI} en la Parcela 2, con un ERP de 8.3 %.

Limitaciones del estudio: Se debe probar la metodología en condiciones no estándar, especialmente las que puedan provocar estrés en el cultivo o con contenido de humedad alto en la capa superficial del suelo.

Originalidad: Se mostró la viabilidad para estimar el K_{cb} del maíz forrajero a nivel parcelario mediante métodos no invasivos, de forma dinámica, en un sitio específico y seguimiento en tiempo *cuasi* real al desarrollo del cultivo.

Conclusiones: La metodología resultó plausible para estimar el K_{cb} del maíz forrajero debido a su precisión, practicidad y disponibilidad de información para grandes extensiones de cultivos.

Palabras clave: *Zea mays*, imágenes satelitales, índices de vegetación, evapotranspiración, Manual FAO-56.

Introduction

The procedure described in the FAO-56 Manual is the most widely used to calculate crop evapotranspiration (ET_c), which is the product of a crop coefficient (K_c) by reference evapotranspiration (ET_0) (Allen et al., 2006). Wright (1982) proposed the dual method, where K_c is the product of the crop basal coefficient (K_{cb}) and the coefficient associated with soil evaporation (K_e). The K_{cb} component represents crop evaporation conditions under conditions where the soil surface is dry (direct evaporation from soil surface is minimal), and crop growth is not limited by water stress, phytosanitary, climatological or physiological factors (Rocha et al., 2011). Currently, K_{cb} is widely used to estimate actual evapotranspiration, which represents the potential baseline K_c value (Allen et al., 2006). The main reference on this subject is the FAO-56 Manual compendium; however, it has certain limitations, because it only provides K_{cb} values at three main stages for each crop and under standard conditions, which are non-existent in true applications (Mhawej et al., 2021).

The crop coefficient methodology is used to estimate ET_c and schedule irrigation (Escarabajal et al., 2015). However, its application calls for the determination of K_{cb} for each crop and stage of development, which requires a variety of methods, many of which are time-consuming, destructive, and expensive in terms of time and money. For this reason, it has been decided to simplify their determination using variables such as leaf area index (Kirk et al., 2009), plant cover fraction (López-Urrea et al., 2009) or crop canopy reflectivity (Neale et al., 1989), among others.

The empirical relationship between biophysical variables and K_{cb} with vegetation indices is increasingly used due to the wide availability of remote sensing information (Odi-Lara et al., 2013). Currently, there are several equations or algorithms estimating K_{cb} for herbaceous crops (maize, wheat and grapevine, among others) using vegetation indices, such as the normalized difference vegetation index (NDVI) and the soil-adjusted vegetation index (SAVI), which are the most widely used because they are easy to calculate and derivable from a multispectral sensor (Candiago et al., 2015). Remote sensing allows estimations of large areas since they provide reliable spatial and temporal information over the crop growth period (Chaudhary & Srivastava, 2021).

Satellites have aroused great interest in the scientific community due to their multiple applications and high spatial, temporal, spectral and radiometric resolution (Borràs et al., 2017). The most widely used are those that provide free and easily accessible information, such as the Sentinel-2 satellite. In addition, satellite imagery, combined with geographic information technologies,

Introducción

El procedimiento descrito en el Manual FAO-56 es el más utilizado para calcular la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), que consiste en el producto de un coeficiente de cultivo (K_c) por la evapotranspiración de referencia (ET_0) (Allen et al., 2006). Wright (1982) propuso el método dual, donde el K_c es el producto del coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y el coeficiente asociado con la evaporación del suelo (K_e). El componente K_{cb} representa las condiciones de evaporación del cultivo en condiciones donde la superficie del suelo está seca (la evaporación directa desde la superficie del suelo es mínima), y el crecimiento del cultivo no está limitado por el estrés hídrico, fitosanitario, o factores climatológicos o fisiológicos (Rocha et al., 2011). En la actualidad, se emplea ampliamente el K_{cb} para estimar la evapotranspiración real, que representa la línea base potencial del valor de K_c (Allen et al., 2006). La principal referencia en este tema es el compendio del Manual FAO-56; sin embargo, tiene ciertas limitaciones, ya que solo proporciona valores de K_{cb} en tres etapas principales para cada cultivo y en condiciones estándar, las cuales son inexistentes en aplicaciones reales (Mhawej et al., 2021).

La metodología del coeficiente de cultivo se utiliza para estimar la ET_c y programar el riego (Escarabajal et al., 2015). No obstante, su aplicación requiere la determinación de los K_{cb} de cada cultivo y etapa de desarrollo, para lo cual existen diversos métodos, muchos de los cuales son laboriosos, destructivos, y costosos en términos de tiempo y dinero. Por ello, se ha optado por simplificar su determinación mediante variables como el índice de área foliar (Kirk et al., 2009), la fracción de cobertura vegetal (López-Urrea et al., 2009) o la reflectividad de la cubierta del cultivo (Neale et al., 1989), entre otros.

La relación empírica entre las variables biofísicas y el K_{cb} con índices de vegetación es cada vez más utilizado debido a la amplia disponibilidad de información de sensores remotos (Odi-Lara et al., 2013). Actualmente, existen varias ecuaciones o algoritmos que estiman el K_{cb} para cultivos herbáceos (maíz, trigo y vid, entre otros) mediante índices de vegetación, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), que son los más usados por su facilidad de cálculo y derivables a partir de un sensor multispectral (Candiago et al., 2015). El uso de sensores remotos permite estimaciones de grandes superficies, ya que proporcionan información espacial y temporal confiable durante el período de crecimiento del cultivo (Chaudhary & Srivastava, 2021).

Los satelitales han despertado un gran interés en la comunidad científica debido a sus múltiples aplicaciones, así como su alta resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica (Borràs et al., 2017). Los más utilizados

are used with the objective of optimizing agricultural productivity, by considering spatial variability, as it is associated with each production plot (Lizarazo-Salcedo & Alfonso-Carvajal, 2011).

The Lagunera Region, where irrigation district (RD) 017 is located, is one of the main dairy basins at the national level, and livestock is fed mainly alfalfa, silage and concentrates. Maize silage is the most common, as it can account for 30 to 40% of the diet (on a dry basis) of production cows (González-Castañeda et al., 2005). Maize silage is a crop with high productivity, low protein content and good energy value (Núñez-Hernández et al., 2003). This has led to an increase in the areas planted with this crop, since it is also one of the forages that require less water (Arreola et al., 2016). In the last four years, this has been the main crop in the region, with a current area of 54 000 ha (Reyes-González et al., 2022), out of a total irrigated area of 167 000 ha.

The region has two sources of water for crop irrigation: surface water (river water) and groundwater (well water), but both sources are limited and have low availability. This situation forces producers to implement strategies to increase the efficient use of irrigation water, such as canal rehabilitation, pond construction, land leveling, and land irrigation technification, among others. However, all these efforts will not give the best results if they do not start from the principle of applying only the water requirements of the crops. Therefore, it is essential to make practical and operative estimates of K_{cb} throughout the growing season, to later calculate ET_c and schedule irrigation with an efficient use of water.

The use of spectral information from Sentinel-2 satellite imagery is an alternative to the FAO-56 method to calculate K_{cb} . Therefore, the objective of this study was to evaluate nine algorithms (six using NDVI and three using SAVI) to estimate the K_{cb} of forage maize during the whole vegetative cycle in two plots with different water sources and different irrigation management. The algorithms with the best accuracies were identified when compared with the K_{cb} derived from tables in the FAO-56 Manual (Allen et al., 2006).

Materials and methods

The study was conducted during the spring-summer 2021 cycle in two forage maize plots located in the municipality of Francisco I. Madero, Coahuila, Mexico. Both plots are part of the irrigated area of Module XII of DR 017 Región Lagunera (Table 1; Figure 1). The climate is dry warm desert, with rainfall in summer and cool winter. Average annual rainfall is 258 mm and average annual evaporation is 2 000 mm, so the precipitation

son los que proporcionan información gratuita y de fácil acceso, como el satélite Sentinel-2. Además, las imágenes satelitales, combinadas con tecnologías de información geográfica, se utilizan con el objetivo de optimizar la productividad agrícola, al considerar la variabilidad espacial, ya que se asocia a cada predio de producción (Lizarazo-Salcedo & Alfonso-Carvajal, 2011).

La Región Lagunera, donde se encuentra el distrito de riego (DR) 017, es una de las principales cuencas lecheras a nivel nacional, y su ganado es alimentado, fundamentalmente, con alfalfa, ensilaje y concentrados. El ensilaje de maíz es el más común, ya que puede constituir del 30 al 40 % de la ración (en base seca) de las vacas de producción (González-Castañeda et al., 2005). El maíz forrajero es un cultivo con alta productividad, contenidos bajos de proteína y buen valor energético (Núñez-Hernández et al., 2003). Lo anterior ha provocado que incrementen las áreas sembradas con este cultivo, ya que, además, es uno de los forrajes que requieren menos agua (Arreola et al., 2016). En los últimos cuatro años, este ha sido el principal cultivo en la región, con una superficie actual de 54 000 ha (Reyes-González et al., 2022), de una superficie total de riego de 167 000 ha.

La región dispone de dos fuentes de agua para el riego de cultivos: superficial (agua de río) y subterránea (agua de pozo), pero ambas fuentes están limitadas y con poca disponibilidad. Esto obliga a los productores a implementar estrategias para incrementar el uso eficiente del agua de riego, como rehabilitación de canales, construcción de estanques, nivelación de tierras y tecnificación del riego parcelario, entre otros. Sin embargo, todos estos esfuerzos no darán los mejores resultados sino se parte del principio de aplicar sólo los requerimientos hídricos de los cultivos. Por ello, es importante realizar estimaciones prácticas y operativas del K_{cb} durante todo el ciclo vegetativo, para posteriormente calcular la ET_c y programar los riegos haciendo un uso eficiente del agua.

El uso de información espectral de imágenes del satélite Sentinel-2 es una alternativa al método de FAO-56 para calcular el K_{cb} . Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar nueve algoritmos (seis que utilizan el índice NDVI y tres el SAVI), para estimar el K_{cb} del maíz forrajero durante todo el ciclo vegetativo en dos parcelas con distinta fuente de agua y diferente manejo de riego. Se identificaron los algoritmos que presentan las mejores precisiones al compararlos con el K_{cb} obtenido de tablas del Manual FAO-56 (Allen et al., 2006).

Materiales y métodos

El estudio se realizó durante el ciclo primavera – verano 2021 en dos parcelas de maíz forrajero ubicadas en el municipio de Francisco I. Madero, Coahuila, México.

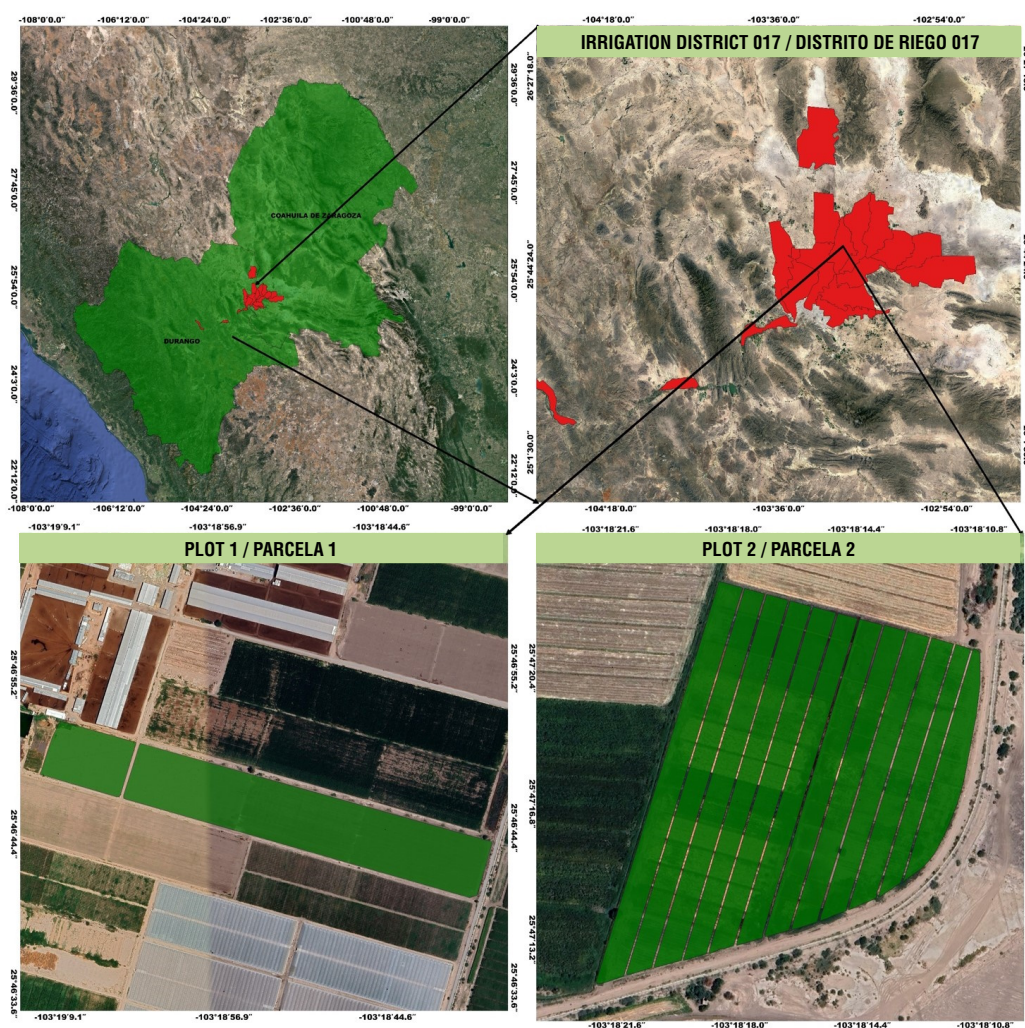


Figure 1. Study area.

Figura 1. Localización del área de estudio.

Table 1. Geographical location, planting and harvesting dates, and main characteristics of the study plots.

Cuadro 1. Localización geográfica, fechas de siembra y cosecha, y características principales de las parcelas de estudio.

Characteristics/ Característica	Plot 1/Parcela 1	Plot 2/Parcela 2
Latitude/Latitud	25° 46' 44.86" N	25° 47' 17.44" N
Longitude/Longitud	103° 18' 48.65" O	103° 18' 15.96" O
Hybrid/Híbrido	N83N5 (SYNGENTA)	8576 (ABT)
Sowing date/Fecha de siembra	February 26, 2021/ 26 de febrero de 2021	April 09, 2021/ 09 de abril de 2021
Harvesting date/Fecha de cosecha	June 28, 2021/ 28 de junio de 2021	August 09, 2021/ 09 de agosto de 2021
Water source/Fuente de agua	Surface and Groundwater/ Superficial y subterránea	Surface/ Superficial
Irrigated area (ha)/ Superficie de riego (ha)	11.41	6.32
Irrigation system/ Tipo de sistema de riego	Alphaliferous Valves/ Válvulas alfalferas	Gravity/ Gravedad
Predominant soil texture/ Textura de suelo predominante	Silty clay loam/ Franco arcillo-limoso	Clay/ Arcilloso

– evaporation ratio is 1:10. The average annual temperature is 21 °C, with a maximum of 33.7 °C and a minimum of 7.5 °C (García, 2004).

In both plots, seven seeds per linear meter were sown, with a row spacing of 0.76 m; this resulted in a sowing density of about 92 thousand plants·ha⁻¹. In Plot 1, five irrigations were applied: one pre-planting irrigation and four auxiliary irrigations. This property has surface (river) and groundwater (well) rights. The pre-sowing irrigation and the first auxiliary irrigation were applied with well water, and river water was used for the rest of the irrigation. In Plot 2, only surface water was used, and a pre-planting irrigation and two auxiliary irrigations were applied during the vegetative cycle.

Download and processing of satellite imagery

Twenty-six multispectral images from the cloud-free Sentinel 2A and 2B satellites were used, which satisfactorily covered the maize vegetative cycle in the two study plots. These satellites provide radiometric data through 13 bands: four spectral bands with a spatial resolution of 10 m, six of 20 m, and three of 60 m; at a temporal resolution of five days. The images were downloaded for free from the Copernicus Open Access Hub website (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), in GeoTIFF format and a typical compression of 950 MB per image. Orthorectified and atmospherically corrected images were downloaded, with processing level 2A, in which reflectance values are corrected for distortion caused by aerosols and atmospheric water vapor.

Subsequently, the polygons of interest in both plots were cut out using the freely available QGIS v. 3.10.6 (2020) program. For this purpose, one melga per plot was selected. The melga in Plot 1 was 125 m long and 20 m wide, while the melga in Plot 2 had the same width but was 290 m long. Consequently, the study areas were 2 500 and 5 800 m², respectively.

Estimating NDVI and SAVI indices

To estimate the K_{cb} of forage maize using remote sensing with the algorithms mentioned in Table 2, it is necessary to estimate the vegetation indices (NDVI and SAVI).

NDVI (Rouse et al., 1974) was calculated with Equation 1, for each scene in the area of interest.

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

where NDVI is the normalized difference vegetation index (dimensionless), NIR is the reflectance in the near infrared band (%) and R is the reflectance in the red band (%). According to the spectral bands included in the

Ambas parcelas forman parte de la superficie de riego del Módulo XII del DR 017 Región Lagunera (Cuadro 1; Figura 1). El clima es seco desértico cálido, con lluvias en verano e invierno fresco. La precipitación pluvial media anual es de 258 mm y la evaporación media anual es de 2000 mm, por lo que la relación precipitación – evaporación es 1:10. La temperatura media anual es de 21 °C, con máxima de 33.7 °C y mínima de 7.5 °C (García, 2004).

En ambas parcelas se establecieron siete semillas por metro lineal, con una separación entre surcos de 0.76 m; esto resultó en una densidad de siembra de alrededor de 92 mil plantas·ha⁻¹. En la Parcela 1 se aplicaron cinco riegos: un riego de presiembra y cuatro riegos de auxilio. Este predio dispone de derechos de agua superficial (río) y subterránea (pozo). El riego de presiembra y primer auxilio se aplicaron con agua de pozo, y para el resto de los riegos se utilizó agua de río. En la Parcela 2 solamente se empleó agua superficial, y se aplicaron un riego de presiembra y dos riegos de auxilio durante el ciclo vegetativo.

Descarga y procesamiento de las imágenes de satélite

Se utilizaron 26 imágenes multiespectrales de los satélites Sentinel 2A y 2B sin nubosidad, las cuales cubrieron satisfactoriamente el ciclo vegetativo del maíz en las dos parcelas de estudio. Estos satélites proporcionan datos radiométricos a través de 13 bandas: cuatro bandas espectrales con resolución espacial de 10 m, seis de 20 m y tres de 60 m; a una escala temporal de cinco días. Las imágenes se descargaron de forma gratuita del sitio web *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), en formato GeoTIFF y una compresión típica de 950 MB por imagen. Se descargaron imágenes ortorectificadas y corregidas atmosféricamente, con un nivel de procesamiento 2A, en el cual se corrigen los valores de reflectancia de la distorsión provocada por aerosoles y vapor de agua en la atmósfera.

Posteriormente, se recortaron los polígonos de interés en ambas parcelas mediante el programa QGIS v. 3.10.6 (2020) de libre acceso. Para ello, se seleccionó una melga por parcela. La melga de la Parcela 1 era de 125 m de longitud y 20 m de ancho, mientras que la melga de la Parcela 2 presentó el mismo ancho, pero con una longitud de 290 m. Por consiguiente, las superficies de estudio fueron de 2 500 y 5 800 m², respectivamente.

Cálculo de los índices NDVI y SAVI

Para estimar el K_{cb} del maíz forrajero mediante teledetección con los algoritmos mencionados en el Cuadro 2, es indispensable calcular los índices de vegetación (NDVI y SAVI).

Sentinel-2 imagery; B8 corresponds to the NIR band and B4 to the R band, both with a spatial resolution of 10 m.

The SAVI index (Huete, 1988) was calculated using Equation 2:

$$SAVI = \frac{(1+L) \times (NIR-R)}{(NIR+R+L)} \quad (2)$$

Where L is a soil brightness correction factor, which minimizes the influence of soil on canopy reflectance, and therefore varies inversely according to the quantity of vegetation present (Qi et al., 1994). Therefore, in soils with vegetative development, the L factor is considered as zero, and the SAVI becomes equivalent to the NDVI equation. For this study, in the two plots, L values from 0.10 to 0.30 were used during the first 50 days after sowing (DAS) for Plot 1 and 63 DAS for Plot 2. In both plots, the value of zero was used for the rest of the cycle, because at this stage the crop had higher vegetative cover.

Measures of central tendency (mean and mode) of the aforementioned indexes were estimated at the melga level using the “Zonal Statistics” plug-in (installed in QGIS v. 3.10.6). These values were compared with the values of maize K_{cb} tables provided by the FAO-56 Manual (Allen et al., 2006).

Preparation of the maize K_{cb} curve

For the elaboration of the K_{cb} curve of forage maize, the tables of the FAO-56 Manual (Allen et al., 2006) were consulted, where the K_{cb} values were selected at the initial ($K_{cb\ ini}$), middle ($K_{cb\ mid}$) and final ($K_{cb\ fin}$) stages (0.15, 1.15 and 0.50, respectively). The $K_{cb\ fin}$ corresponds to the condition when the crop is harvested with a high percentage of moisture in the grain or for forage, as was the case. The K_{cb} values in tables are for sub-humid climates, with minimum relative humidity (RH_{min}) of 45 % and wind speed (VV) of $2\ m \cdot s^{-1}$. Therefore, an adjustment was made to the K_{cb} in the two study plots based on the methodology described in the FAO-56 Manual (Allen et al., 2006). In Plot 1, K_{cb} values of 1.18 and 0.52 were determined for the middle and final stages, respectively. For Plot 2, the same K_{cb} values from tables were used for all growth stages since there were no differences between the adjusted K_{cb} and tables K_{cb} .

Growth stage lengths of forage maize were determined using the tables in the FAO-56 Manual (Allen et al., 2006). Also, the phenology of the crop was recorded in the field, the degree days of development (DDD) and the leaf area index (LAI) were estimated to complement the K_{cb} curve of the crop of interest. The residual method (Equation 3) was used to calculate DDD (Snyder, 1985). The base temperature used was $10\ ^\circ C$, and the maximum temperature was $30\ ^\circ C$; these values

El NDVI (Rouse et al., 1974) se calculó con la Ecuación 1, para cada escena en el área de interés.

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

donde $NDVI$ es el índice de vegetación de diferencia normalizada (adimensional), NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (%) y R es la reflectancia en la banda del rojo (%). De acuerdo con las bandas espectrales 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 cuanto al índice $SAVI$ (Huete, 1988), este se calculó mediante la Ecuación 2:

$$SAVI = \frac{(1+L) \times (NIR-R)}{(NIR+R+L)} \quad (2)$$

Donde L es un factor de corrección del brillo del suelo, el cual minimiza la influencia del suelo en la reflectancia del dosel, por lo que varía inversamente con la cantidad de vegetación presente (Qi et al., 1994). En este sentido, en suelos con desarrollo vegetativo, el factor L se considera como cero, y el $SAVI$ se hace equivalente a la ecuación del $NDVI$. Para este estudio, en las dos parcelas se utilizaron valores de L de 0.10 a 0.30, durante los primeros 50 días después de la siembra (dds) en la Parcela 1 y 63 dds en la Parcela 2. En ambas parcelas, el resto del ciclo se empleó el valor de cero, ya que en esta etapa el cultivo presentó mayor cobertura vegetal.

Se estimaron las medidas de tendencia central (promedio y moda) de los índices antes mencionados a nivel melga mediante el complemento “Zonal Statistics” (instalado en QGIS v. 3.10.6). Dichos valores se compararon con los valores de tablas del K_{cb} del maíz proporcionados en el Manual FAO-56 (Allen et al., 2006).

Elaboración de la curva K_{cb} de maíz

Para la elaboración de la curva del K_{cb} del maíz forrajero, se consultaron las tablas del Manual FAO-56 (Allen et al., 2006), donde se seleccionaron los valores de K_{cb} en la etapa inicial ($K_{cb\ ini}$), media ($K_{cb\ med}$) y final ($K_{cb\ fin}$) (0.15, 1.15 y 0.50, respectivamente). El $K_{cb\ fin}$ corresponde a la condición cuando el cultivo se cosecha con alto porcentaje de humedad en el grano o para forraje, como fue el caso. Los valores de K_{cb} de tablas son para climas subhúmedos, con humedad relativa mínima (HR_{min}) de 45 % y velocidad del viento (VV) de $2\ m \cdot s^{-1}$. Por ende, se realizó un ajuste a los K_{cb} en las dos parcelas de estudio con base en la metodología descrita en el Manual FAO-56 (Allen et al., 2006). En la Parcela 1 se determinaron valores del K_{cb} de 1.18 y 0.52 para las etapas medias y final, respectivamente. Con respecto a la Parcela 2, se utilizaron los mismos valores del K_{cb} de tablas en todas las etapas de crecimiento, ya que no

are the most used for maize crop (Hou et al., 2014). For maximum temperatures higher than 30 °C, these were taken as equal to 30 °C.

$$DDD = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_{base} \quad (3)$$

Where T_{max} is the maximum temperature recorded on a specific day (°C), T_{min} is the minimum temperature recorded on a specific day (°C) and T_{base} is the species-specific base temperature.

LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$) was estimated indirectly in the two study plots using the relationship proposed by Kross et al. (2015) (Equation 4).

$$LAI = 11.266 \times NDVI - 4.007 \quad (4)$$

Estimating basal crop coefficient (K_{cb}) with vegetation indices

A total of nine algorithms were used to estimate the K_{cb} of forage maize (Table 2). According to the literature, six algorithms were developed for forage maize, and the rest for wheat (Equation 6) and grapes (Equation 9), considered as herbaceous crops like maize. To employ Equations (10), (13) and (15), the soil line ($NDVI_{min}$ and $SAVI_{min}$) separating the bare soil surface with vegetation was calculated (Rukhovich et al., 2016). The soil line was obtained by simple linear regression of the red band R (independent variable) and near infrared NIR (dependent variable), using only pixels within the plots. At first, linear regression was carried out on the 26 images downloaded from the Sentinel-2 satellite, which fully cover the phenological cycle of forage maize from the two study plots. The image of April 02, 2021, had the highest R^2 value (0.88), and its relationship is shown in Equation 5:

$$NIR = 1.308 \times R + 56.07 \quad (5)$$

Where 1.308 represents the slope and 56.07 is the ordinate to the origin.

With this relationship, and with the QGIS v. 3.10.6 program plug-ins (“RasterDataPlotting” and “QuickWKT”), the $NDVI_{min}$ (0.10) and $SAVI_{min}$ (0.12) soil lines were determined.

Linear Equations (11) and (12) were obtained by simple linear regression between the average NDVI of the two study plots (delimitation by melga) and the value of K_{cb} from tables of the FAO-56 Manual. Both equations were fitted with ordinate to the origin at the null coordinates. Equation (11) was used to estimate the K_{cb} of forage maize in Plot 1 and Equation (12) was used for Plot 2.

se presentaron diferencias entre los K_{cb} ajustados y K_{cb} de tablas.

La duración de las etapas de crecimiento del maíz forrajero se determinó mediante las tablas del Manual FAO-56 (Allen et al., 2006). Asimismo, se registró la fenología del cultivo en campo, se estimaron los grados días de desarrollo (GDD) y el índice de área foliar (IAF) para complementar la curva del K_{cb} del cultivo de interés. Para calcular los GDD se empleó el método residual (Ecuación 3) (Snyder, 1985). La temperatura base empleada fue de 10 °C, y la máxima de 30 °C; estos valores son los más utilizados para el cultivo de maíz (Hou et al., 2014). En caso de temperaturas máximas superiores a 30 °C, se tomaron como iguales a 30 °C.

$$GDD = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_{base} \quad (3)$$

Donde T_{max} es la temperatura máxima registrada en un día determinado (°C), T_{min} es la temperatura mínima registrada en un día determinado (°C) y T_{base} es la temperatura base específica de cada especie.

El IAF ($m^2 \cdot m^{-2}$) se estimó de forma indirecta en las dos parcelas de estudio mediante la relación propuesta por Kross et al. (2015) (Ecuación 4).

$$IAF = 11.266 \times NDVI - 4.007 \quad (4)$$

Estimación del coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) con índices de vegetación

Para estimar el K_{cb} del maíz forrajero se emplearon nueve algoritmos (Cuadro 2). De acuerdo con la literatura, seis algoritmos se generaron para maíz forrajero, y el resto, para trigo (Ecuación 6) y uva (Ecuación 9), considerados como cultivos herbáceos como el maíz. Para emplear las Ecuaciones (10), (13) y (15), se calculó la línea de suelo ($NDVI_{min}$ y $SAVI_{min}$) que separa la superficie del suelo desnudo con la vegetación (Rukhovich et al., 2016). La línea del suelo se obtuvo mediante la regresión lineal simple de la banda roja R (variable independiente) y la infrarroja cercana NIR (variable dependiente), utilizando únicamente los pixels que están dentro de las parcelas. Primero, se realizó la regresión lineal de las 26 imágenes descargadas del satélite Sentinel-2, las cuales cubren totalmente el ciclo fenológico del maíz forrajero de las dos parcelas de estudio. La imagen del 02 de abril de 2021 presentó el mayor valor de R^2 (0.88), y su relación se muestra en la Ecuación 5:

$$NIR = 1.308 \times R + 56.07 \quad (5)$$

Donde 1.308 representa la pendiente y 56.07 es la ordenada al origen.

Table 2. Algorithms used to estimate K_{cb} of forage maize using vegetation indices (IV).**Cuadro 2. Algoritmos utilizados para calcular el K_{cb} del maíz forrajero mediante índices de vegetación (IV).**

Algorithms / Algoritmos	IV	Equation / Ecuación	Source / Fuente
Choudhury K_{cbNDVI}	NDVI	(6) $K_{cb} = 1.25 \times NDVI + 0.20$	Choudhury et al. (1994)
Glez-Piqueras K_{cbNDVI}	NDVI	(7) $K_{cb} = 1.22 \times NDVI + 0.15$	González-Piqueras et al. (2005)
Calera y Glez K_{cbNDVI}	NDVI	(8) $K_{cb} = 1.15 \times NDVI + 0.17$	Calera y González (2007)
Campos K_{cbNDVI}	NDVI	(9) $K_{cb} = 1.44 \times NDVI - 0.10$	Campos et al. (2010)
Argolo K_{cbNDVI}	NDVI	(10) $K_{cb} = K_{cmax} \left[1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^n \right]$	Argolo et al. (2020)
Allen FAO-56 K_{cbNDVI}	NDVI	(11) $K_{cb} = 1.50 \times NDVI$ (12) $K_{cb} = 1.21 \times NDVI$	Allen et al. (2006)
Glez-Dugo K_{cbSAVI}	SAVI	(13) $K_{cb} = \left(\frac{K_{cmax}}{f_{ceff}} \right) \times \left(\frac{SAVI - SAVI_{soil}}{SAVI_{max} - SAVI_{soil}} \right)$	González-Dugo et al. (2009)
Glez-Piqueras K_{cbSAVI}	SAVI	(14) $K_{cb} = 1.60 \times SAVI + 0.21$	González-Piqueras et al. (2005)
Argolo K_{cbSAVI}	SAVI	(15) $K_{cb} = K_{cmax} \left[1 - \left(\frac{SAVI_{max} - SAVI}{SAVI_{max} - SAVI_{min}} \right)^n \right]$	Argolo et al. (2020)

K_{cmax} = mid-stage maize crop coefficient; $NDVI_{max}$ = maximum NDVI value of the scene; $NDVI_{min}$ = NDVI value at the soil line (0.10); n = coefficient related to crop leaf architecture, for NDVI the value of 0.5 is assumed and 1.0 for SAVI; f_{ceff} = fraction of effective soil cover (0.80); $SAVI_{max}$ = maximum SAVI value of the scene; $SAVI_{soil}$ or $SAVI_{min}$ = bare soil value (0.12).

K_{cmax} = coeficiente de cultivo del maíz en la etapa media; $NDVI_{max}$ = valor máximo de NDVI de la escena; $NDVI_{min}$ = valor de NDVI en la línea de suelo (0.10); n = coeficiente relacionado con la arquitectura foliar del cultivo, para NDVI se asume el valor de 0.5 y 1.0 para SAVI; f_{ceff} = fracción de cobertura efectiva del suelo (0.80); $SAVI_{max}$ = valor máximo de SAVI de la escena; $SAVI_{suelo}$ o $SAVI_{min}$ = valor de suelo desnudo (0.12).

To understand the spatial and temporal distribution of estimated K_{cb} in the two study plots, usable soil moisture depletion was determined by gravimetric moisture content sampling before and after each irrigation event.

Statistical analysis

To evaluate the precision of the estimated K_{cb} of forage maize compared to the K_{cb} of tables in the FAO-56 Manual, three statistical indicators were used: 1) coefficient of determination (R^2), which reflects the goodness of fit of a model to the variable it seeks to explain (Equation 16); 2) mean squared error (MSE), which measures the variation of the values estimated compared to the observed ones (Equation 17), and 3) average relative error (ARE), which indicates in percentage of the approximation of the value estimated compared to the real value, the lower the value the better the approximation (Equation 18).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{iobt} - \bar{y}_{iobt})(y_{iest} - \bar{y}_{iest})}{\left[\sum_{i=1}^n (y_{iobt} - \bar{y}_{iobt})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^n (y_{iest} - \bar{y}_{iest})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

$$MSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{iest} - y_{iobt})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$ARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_{iobt} - y_{iest}|}{y_{iobt}} \right) \times 100 \quad (18)$$

where y_{iobt} are the K_{cb} data from FAO-56 Manual tables, \bar{y}_{iobt} is the average of the K_{cb} data from FAO-56 Manual tables, y_{iest} is the K_{cb} data estimated with the algorithms using IV, \bar{y}_{iest} is the average of the K_{cb} data estimated

Con esta relación, y con los complementos del programa QGIS v. 3.10.6 ("RasterDataPlotting" y "QuickWKT"), se obtuvieron las líneas de suelo de $NDVI_{min}$ (0.10) y $SAVI_{min}$ (0.12).

Las Ecuaciones lineales (11) y (12) se obtuvieron mediante una regresión lineal simple entre el NDVI promedio de las dos parcelas de estudio (delimitación por melga) y el valor del K_{cb} de tablas del Manual FAO-56. Ambas ecuaciones se ajustaron con ordenada al origen en las coordenadas nulas. La Ecuación (11) se utilizó para estimar el K_{cb} del maíz forrajero en la Parcela 1 y la Ecuación (12) se empleó para la Parcela 2.

Para entender la distribución espacial y temporal de los K_{cb} estimados en las dos parcelas de estudio, se determinó el abatimiento de humedad aprovechable del suelo mediante muestreos de contenido de humedad gravimétrica antes y después de cada evento de riego.

Análisis estadístico

Para evaluar la precisión de los K_{cb} estimados del maíz forrajero con respecto a los K_{cb} de tablas del Manual FAO-56, se utilizaron tres indicadores estadísticos: 1) coeficiente de determinación (R^2), el cual refleja la bondad de ajuste de un modelo a la variable que pretende explicar (Ecuación 16); 2) cuadrado medio del error (CME), que mide la variación de los valores calculados respecto a los observados (Ecuación 17), y 3) error relativo promedio (ERP), que indica de forma porcentual de la aproximación del valor estimado con

with the algorithms proposed in this study (which use IV and Sentinel-2 satellite images), and n is the number of observations.

Results and discussion

Growth stages of forage maize, as determined by tables of the FAO-56 Manual, are shown in Table 3. For both plots, the vegetative cycle was 122 days. Harvesting was carried out when the crop reached 34 and 35 % dry matter in Plot 1 and Plot 2, respectively; that is, when the maize was in the R_3 and R_4 stages of development, and the grain was identified in a milky state in Plot 2 and in a pasty state in Plot 1. Núñez-Hernández et al. (2005) recommends harvesting at 28 to 35 % dry matter to promote good fermentation during the maize silage process. In addition, in this range, forage losses during harvesting are minimal.

A difference of 196.5 DDD at the final stage of crop growth ($K_{cb\ fin}$) was recorded between the two plots, with Plot 2 accumulating the largest amount of thermal energy. This depends on the sowing dates and geographic location of the plots, but also on irrigation management, which influences water availability and affects temperature, which decreases both water and thermal stress. Thus, forage maize is especially sensitive at the grain filling stage (Zhu & Burney, 2022). Núñez-Hernández et al. (2005) reported a value of 1470 DDD, accumulated in 103 days of vegetative cycle of a forage maize hybrid evaluated in the same study area.

LAI of Plot 1 was higher than that of Plot 2 from the development stage ($K_{cb\ dev}$) to the final stage of the crop

respecto al valor real, mientras el valor sea menor mejor es la aproximación (Ecuación 18).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{iobt} - \bar{y}_{iobt})(y_{iest} - \bar{y}_{iest})}{(\sum_{i=1}^n (y_{iobt} - \bar{y}_{iobt})^2)^{\frac{1}{2}} (\sum_{i=1}^n (y_{iest} - \bar{y}_{iest})^2)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \quad (16)$$

$$CME = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{iest} - y_{iobt})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$ERP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_{iobt} - y_{iest}|}{y_{iobt}} \right) \times 100 \quad (18)$$

donde y_{iobt} son los datos de K_{cb} obtenidos de tablas del Manual FAO-56, \bar{y}_{iobt} es el promedio de los datos de K_{cb} obtenidos de tablas del Manual FAO-56, y_{iest} son los datos de K_{cb} estimados con los algoritmos que utilizan IV, \bar{y}_{iest} es el promedio de los datos de K_{cb} estimados con los algoritmos propuestos en este estudio (los cuales utilizan IV e imágenes satelitales Sentinel-2) y n es el número de observaciones.

Resultados y discusión

La duración de las etapas de crecimiento del maíz forrajero determinadas por tablas del Manual FAO-56 se presenta en el Cuadro 3. En ambas parcelas, el ciclo vegetativo fue de 122 días. La cosecha se realizó cuando el cultivo adquirió 34 y 35 % de materia seca en la Parcela 1 y Parcela 2, respectivamente; es decir, cuando el maíz se encontraba en las etapas de desarrollo R_3 y R_4 , y el grano se identificó en estado lechoso en la Parcela 2 y en estado pastoso en la Parcela 1. Núñez-Hernández et al. (2005) recomienda cosechar con un 28 a 35 % de materia seca para promover una buena fermentación durante el proceso de ensilaje de maíz. Además, en dicho rango, las pérdidas de forraje durante la cosecha son mínimas.

Table 3. Length of growth stages and phenology of the forage maize crop.

Cuadro 3. Duración de las etapas de crecimiento y fenología del cultivo de maíz forrajero.

	Plot 1 / Parcela 1				Plot 2 / Parcela 2			
	$K_{cb\ ini}$	$K_{cb\ dev}$	$K_{cb\ mid}$	$K_{cb\ fin}$	$K_{cb\ ini}$	$K_{cb\ dev}$	$K_{cb\ mid}$	$K_{cb\ fin}$
Stage length (days) / Duración de la etapa (días)	31	51	30	10	31	51	30	10
Crop phenology / Fenología del cultivo	V_E-V_4	V_4-V_T	V_T-R_3	R_3-R_4	V_E-V_5	V_5-V_8	V_8-R_2	R_2-R_3
Cumulative DDD (°C) / GDD acumulado (°C)	312.9	945.9	1376.1	1526.1	393.3	1128.7	1572.3	1722.6
Leaf area index ($m^2 \cdot m^{-2}$) / Índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$)	0.0	3.0	5.1	3.2	0.0	2.7	4.9	2.6

$K_{cb\ ini}$ = basal coefficient initial stage; $K_{cb\ dev}$ = basal coefficient developmental stage; $K_{cb\ mid}$ = basal coefficient middle stage; $K_{cb\ fin}$ = basal coefficient final stage; DDD = degree days of development; V_E-V_4 = from emergence to vegetative stage with fourth leaf; V_4-V_T = from vegetative stage with fourth leaf to panicle; V_T-R_3 = from panicle to reproductive stage with milky grain; R_3-R_4 = from reproductive stage with milky grain to reproductive stage with doughy grain; V_E-V_5 = from emergence to vegetative stage with the fifth leaf; V_5-V_8 = from vegetative stage with the fifth leaf to vegetative stage with the eighth leaf; V_8-R_2 = from vegetative stage with the eighth leaf to reproductive stage with granulation; R_2-R_3 = from reproductive stage with granulation to reproductive stage with milky grain.

$K_{cb\ ini}$ = coeficiente basal etapa inicial; $K_{cb\ dev}$ = coeficiente basal etapa de desarrollo; $K_{cb\ mid}$ = coeficiente basal etapa media; $K_{cb\ fin}$ = coeficiente basal etapa final; GDD = grados días de desarrollo; V_E-V_4 = de la emergencia a la etapa vegetativa con la cuarta hoja; V_4-V_T = de la etapa vegetativa con la cuarta hoja al panojamiento; V_T-R_3 = del panojamiento a la etapa reproductiva con grano lechoso; R_3-R_4 = de la etapa reproductiva con grano lechoso a la etapa reproductiva con grano masoso; V_E-V_5 = de la emergencia a la etapa vegetativa con la quinta hoja; V_5-V_8 = de la etapa vegetativa con la quinta hoja a la etapa vegetativa con la octava hoja; V_8-R_2 = de la etapa vegetativa con la octava hoja a la etapa reproductiva con granulación; R_2-R_3 = de la etapa reproductiva con granulación a la etapa reproductiva con grano lechoso.

($K_{cb_{fin}}$), which is due to the higher number of irrigations and better distribution of these in Plot 1, resulting in lower depletion of available soil moisture (ASM) (Figure 2) and, consequently, lower water stress. Higher water stress has an impact on lower foliage production per unit area and lower biomass accumulation due to lower photosynthetically active radiation interception, which eventually leads to lower yield (Song et al., 2019). Montemayor-Trejo et al. (2007) reported maximum IAF values of 3.4 at 78 DAS of forage maize (development stage), in Comarca Lagunera, Mexico, when gravity irrigation was applied. However, in another study conducted in the same region, maximum values of IAF of 5 were reported in this same crop, values similar to those found in this study, but with drip irrigation (Montemayor-Trejo et al., 2012).

Figure 2 shows the ASM of the soil profile determined by gravimetric moisture content sampling before and after irrigation, and average values of available moisture at a depth of 120 cm (15.4 % for Plot 1 and 13.5 % for Plot 2). Plot 2 showed the highest ASM (0 %) before applying the first relief irrigation (1.R.I.), which was applied 63 days after applying the pre-sowing irrigation (R.P.) and at 55 DAS. The programming of DR 017 is based on the requirements of the cotton crop, but it is not suitable for forage maize, which is reflected in low yields and low forage quality. In Plot 1 the highest ASM (34 %) was observed before 3.R.I.,

Se registró una diferencia de 196.5 GDD al cumplir la etapa final de crecimiento del cultivo ($K_{cb_{fin}}$) entre las dos parcelas, siendo la Parcela 2 la que acumuló mayor cantidad de energía térmica. Esto depende de las fechas de siembra y la ubicación geográfica de las parcelas, pero también del manejo del riego, el cual influye en la disponibilidad de agua y afecta la temperatura, lo que disminuye tanto el estrés hídrico como térmico. En este sentido, el maíz forrajero es especialmente sensible en la etapa de llenado de grano (Zhu & Burney, 2022). Núñez-Hernández et al. (2005) reportó un valor de 1470 GDD, acumulado en 103 días de ciclo vegetativo de un híbrido de maíz forrajero evaluado en la misma área de estudio.

El IAF de la Parcela 1 fue mayor que el de la Parcela 2 desde la etapa de desarrollo ($K_{cb_{des}}$) hasta la etapa final del cultivo ($K_{cb_{fin}}$), lo cual se debe al mayor número de riegos y mejor distribución de éstos en la Parcela 1, por lo que presentó menores abatimientos de humedad aprovechable (AHA) del suelo (Figura 2) y, por consiguiente, menor estrés hídrico. Un mayor estrés hídrico repercute en una menor producción de follaje por unidad de área y una acumulación de biomasa más baja debido a una menor intercepción de radiación fotosintéticamente activa, lo cual, eventualmente, conduce a un menor rendimiento (Song et al., 2019). Montemayor-Trejo et al. (2007) reportó valores máximos de IAF de 3.4 a los 78 dds del maíz forrajero (etapa de desarrollo), en la Comarca Lagunera, México, al aplicar

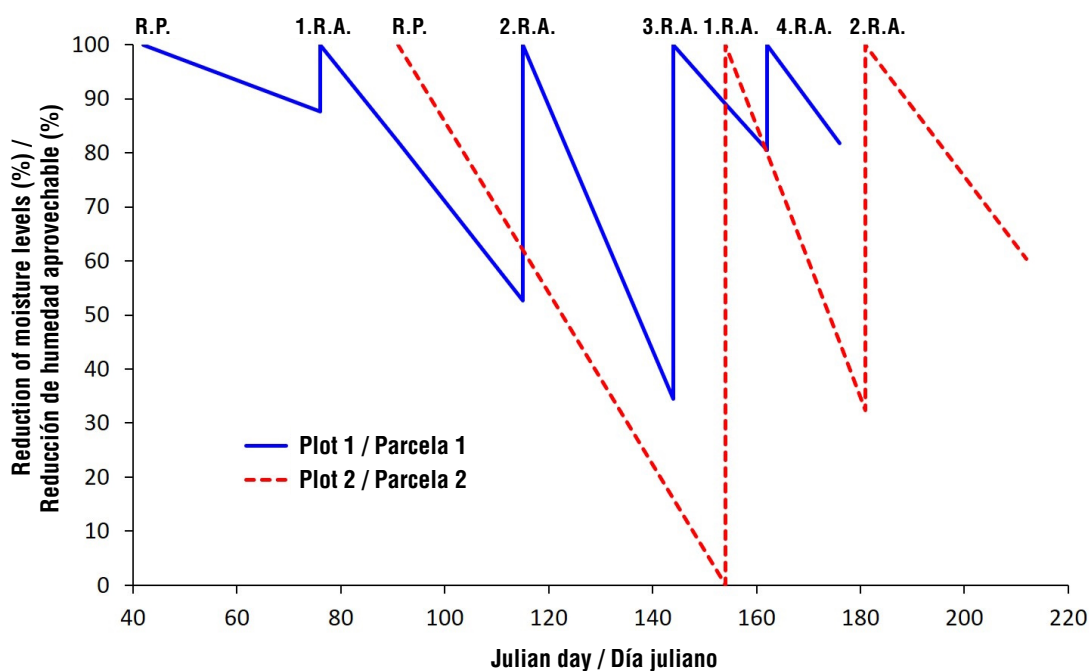


Figure 2. Temporal distribution of available soil moisture (ASM) depletion of the two study plots. RP = pre-sowing irrigation; RA = relief irrigation

Figura 2. Distribución temporal del abatimiento de humedad aprovechable (AHA) del suelo de las dos parcelas de estudio. RP = riego de presiembra; RA = riego de auxilio.

which was applied 29 days after 2.R.I. The rest of the irrigations, in both plots, were applied between 88 and 53 % of the ASM of the soil. The consumption of 50 % of available moisture is the optimum criterion for applying gravity irrigation to the study plots.

Table 4 shows the comparison of the K_{cb} estimated by the algorithms used in this study and the K_{cb} reported in the FAO-56 Manual during the initial, development, middle and final stages of the forage maize crop established in Plot 1. It is observed that the measure of central tendency showing lower values of error in the estimation of K_{cb} in all the algorithms used was the average at the melga level. Also, the Campos K_{cbNDVI} algorithm had the lowest MSE value, both at the initial stage ($K_{cb\ ini}$) and at the development stage ($K_{cb\ dev}$). With reference to the middle stage ($K_{cb\ mid}$), the Glez-Dugo K_{cbSAVI} algorithm had the lowest MSE value, and for the final stage ($K_{cb\ fin}$) it was the Glez-Piqueras K_{cbNDVI} algorithm. When considering the four growth stages of forage maize, the Allen FAO-56 K_{cbNDVI} and Argolo K_{cbSAVI} algorithms showed the lowest MSE values. However, the Campos K_{cbNDVI} algorithm presented, in each of the growth stages, values lower than 22 % of ARE, and in the whole vegetative cycle a ARE of 11.6 %, reaching an accuracy of 88.4 %. The above is satisfactory for estimating ET_c using vegetation indices, since, according to Alfieri et al. (2017), an accuracy of 80 % is required.

riego por gravedad. Sin embargo, en otro estudio que se realizó en la misma región, se reportan valores máximos de IAF de 5 en este mismo cultivo, valores similares a los encontrados en este trabajo, pero con riego por goteo (Montemayor-Trejo et al., 2012).

En la Figura 2 se presenta el AHA del perfil del suelo obtenido mediante muestreos de contenido de humedad gravimétrica antes y después de riego, y valores promedio de humedad aprovechable a una profundidad de 120 cm (15.4 % para la Parcela 1 y 13.5 % para la Parcela 2). La Parcela 2 presentó el mayor AHA (0 %) antes de aplicar el primer riego de auxilio (1.R.A.), el cual se aplicó a los 63 días después de aplicar el riego de presiembra (R.P.) y a los 55 dds. La programación del DR 017 se realiza con base en los requerimientos del cultivo de algodón, pero no es adecuado para el maíz forrajero, lo cual se refleja en bajos rendimientos y baja calidad de forraje. En la Parcela 1 se observó el mayor AHA (34 %) antes del 3.R.A., el cual se aplicó a los 29 días después del 2.R.A. El resto de los riegos, en ambas parcelas, se aplicaron entre 88 y 53 % del AHA del suelo, siendo el consumo del 50 % de humedad aprovechable el criterio óptimo para aplicar riego por gravedad a las parcelas de estudio.

En el Cuadro 4 se presenta la comparación del K_{cb} estimado por los algoritmos utilizados en esta investigación y el K_{cb} reportado en el Manual FAO-56

Table 4. Comparison of the K_{cb} calculated by the algorithms and K_{cb} obtained from the FAO-56 Manual during the growth stages of forage maize grown in Plot 1.

Cuadro 4. Comparación del K_{cb} calculado por los algoritmos y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 durante las etapas de crecimiento del maíz forrajero establecido en la Parcela 1.

Algorithms / Algoritmos	MCT / MTC	$K_{cb\ ini}$ (n = 6)		$K_{cb\ dev}$ (n = 7)		$K_{cb\ mid}$ (n = 6)		$K_{cb\ fin}$ (n = 2)		$K_{cb\ cycle}$ (n = 21)		
		MSE / CME	ARE / ERP	MSE / CME	ARE / ERP	MSE / CME	ARE / ERP	MSE / CME	ARE / ERP	R ²	MSE / CME	ARE / ERP
Choudhury K_{cbNDVI}	AVG / Prom	0.26	170.8	0.20	29.5	0.10	8.2	0.29	29.6	0.92	0.21	19.6
Glez-Piqueras K_{cbNDVI}	AVG / Prom	0.20	134.2	0.14	19.3	0.17	14.2	0.12	1.5	0.92	0.18	9.9
Calera y Glez K_{cbNDVI}	AVG / Prom	0.21	139.8	0.13	16.9	0.20	16.7	0.21	17.5	0.92	0.18	7.9
Campos K_{cbNDVI}	AVG / Prom	0.04	8.3	0.06	2.9	0.26	22.2	0.17	8.8	0.92	0.16	11.6
Argolo K_{cbNDVI}	AVG / Prom	0.10	63.9	0.17	23.7	0.47	39.5	0.21	18.1	0.87	0.28	33.6
Allen FAO-56 K_{cbNDVI}	AVG / Prom	0.10	59.5	0.10	13.6	0.16	13.2	0.24	21.9	0.92	0.14	4.0
Glez-Dugo K_{cbSAVI}	AVG / Prom	0.07	7.4	0.27	37.0	0.06	3.6	0.39	44.4	0.90	0.20	18.2
Glez-Piqueras K_{cbSAVI}	AVG / Prom	0.36	239.1	0.44	68.6	0.16	13.6	0.52	60.2	0.90	0.37	50.8
Argolo K_{cbSAVI}	AVG / Prom	0.07	25.9	0.09	9.6	0.21	17.1	0.20	15.5	0.90	0.14	5.5

MCT = measure of central tendency; AVG = average; R² = coefficient of determination (dimensionless); MSE = mean squared error (dimensionless); ARE = average relative error (%); n = number of observations (satellite images used); $K_{cb\ ini}$ = initial basal crop coefficient; $K_{cb\ dev}$ = developmental basal crop coefficient; $K_{cb\ mid}$ = mean basal crop coefficient; $K_{cb\ fin}$ = final basal crop coefficient; $K_{cb\ cycle}$ = cycle basal crop coefficient.

MTC = medida de tendencia central; Prom = promedio; R² = coeficiente de determinación (adimensional); CME = cuadrado medio del error (adimensional); ERP = error relativo promedio (%); n = número de observaciones (imágenes satelitales utilizadas); $K_{cb\ ini}$ = coeficiente de cultivo basal inicial; $K_{cb\ dev}$ = coeficiente de cultivo basal de desarrollo; $K_{cb\ med}$ = coeficiente de cultivo basal medio; $K_{cb\ fin}$ = coeficiente de cultivo basal final; $K_{cb\ ciclo}$ = coeficiente de cultivo basal del ciclo.

Table 5 shows that the mode had lower MSE values in most of the algorithms used to calculate K_{cb} in Plot 2, except for the equations Campos K_{cbNDVI} , Argolo K_{cbNDVI} and Allen FAO-56 K_{cbNDVI} . In these expressions, the average had lower MSE value. The Argolo K_{cbSAVI} algorithm had lower MSE values in the $K_{cb\ ini}$ and $K_{cb\ dev}$ stages. For $K_{cb\ mid}$ and $K_{cb\ fin}$ stages, the lowest MSE value was with Choudhury K_{cbNDVI} . However, when considering the whole maize growing cycle, the Argolo K_{cbSAVI} algorithm had the lowest MSE value, but Argolo K_{cbNDVI} algorithm had values lower than 13 % of ARE at the four stages of maize growth, and 8.3 % of ARE in the whole growing cycle, resulting in an accuracy of 91.7 %.

The Campos K_{cbNDVI} algorithm had the lowest ARE values in the two plots studied, both by growth stage and in the whole vegetative cycle, except for $K_{cb\ ini}$ and $K_{cb\ dev}$ stages in Plot 2. Thus, this algorithm is reliable for estimating K_{cb} of forage maize with different surface irrigation management.

Figures 3 and 4 show the distribution of the calculated K_{cb} and the K_{cb} reported in the FAO-56 Manual of crop growth. In Plot 1 it is observed that in the $K_{cb\ ini}$ and $K_{cb\ dev}$ stages of the crop most of the algorithms overestimate K_{cb} . In the $K_{cb\ ini}$ stage the algorithms overestimated K_{cb} from 60 to 239 %, and in the $K_{cb\ dev}$ stage they overestimated K_{cb} from 10 to 69 %. In contrast, at the $K_{cb\ mid}$ stage most algorithms underestimated K_{cb} from 4 to 40 %, and at the $K_{cb\ fin}$ stage most overestimated K_{cb} from 2 to 60 %. Five irrigations were applied throughout

durante las etapas inicial, desarrollo, media y final del cultivo del maíz forrajero establecido en la Parcela 1. Se observa que la medida de tendencia central que presentó valores menores de error en el cálculo del K_{cb} en todos los algoritmos utilizados fue el promedio a nivel melga. También, se distingue que el algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó menor valor de CME, tanto en la etapa inicial ($K_{cb\ ini}$) como en la etapa de desarrollo ($K_{cb\ des}$). Con referencia a la etapa media ($K_{cb\ med}$), el que presentó menor valor de CME fue el algoritmo Glez-Dugo K_{cbSAVI} , y en la etapa final ($K_{cb\ fin}$) fue el algoritmo Glez-Piqueras K_{cbNDVI} . Al considerar las cuatro etapas de crecimiento del maíz forrajero, los algoritmos Allen FAO-56 K_{cbNDVI} y Argolo K_{cbSAVI} mostraron los menores valores de CME. Sin embargo, el algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó, en cada una de las etapas de crecimiento, valores menores de 22 % de ERP, y en todo el ciclo vegetativo un ERP de 11.6 %, con lo cual se alcanzó una precisión de 88.4 %. Lo anterior resulta satisfactorio para estimar la ET_c mediante índices de vegetación, ya que, de acuerdo con Alfieri et al. (2017), se requiere una precisión de 80 %.

En el Cuadro 5 se observa que la moda presentó menor valor de CME en la mayoría de los algoritmos utilizados para calcular el K_{cb} en la Parcela 2, con excepción de las ecuaciones Campos K_{cbNDVI} , Argolo K_{cbNDVI} y Allen FAO-56 K_{cbNDVI} . En estas expresiones, el promedio mostró menor valor de CME. Asimismo, el algoritmo Argolo K_{cbSAVI} presentó menores valores de CME en las etapas $K_{cb\ ini}$ y $K_{cb\ des}$. Para las etapas $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$, el menor

Table 5. Comparison of K_{cb} calculated by the algorithms and the K_{cb} obtained from the FAO-56 Manual during the growth stages of forage maize grown in Plot 2.

Cuadro 5. Comparación del K_{cb} calculado por los algoritmos y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 durante las etapas de crecimiento del maíz forrajero establecido en la Parcela 2.

Algorithms/ Algoritmos	MCT/ MTC	$K_{cb\ ini}$ (n = 3)		$K_{cb\ dev}$ (n = 10)		$K_{cb\ med}$ (n = 3)		$K_{cb\ fin}$ (n = 1)		$K_{cb\ cycle}$ (n = 17)		
		MSE/ CME	ARE/ ERP	MSE/ CME	ARE/ ERP	MSE/ CME	ARE/ ERP	MSE/ CME	ARE/ ERP	R ²	MSE/ CME	ARE/ ERP
Choudhury K_{cbNDVI}	Moda	0.31	202.8	0.14	13.3	0.05	0.7	0.03	3.2	0.92	0.17	15.6
Glez-Piqueras K_{cbNDVI}	Moda	0.25	165.4	0.12	3.4	0.09	7.0	0.04	3.4	0.92	0.14	6.0
Calera y Glez K_{cbNDVI}	Moda	0.26	169.2	0.12	2.0	0.12	9.9	0.07	6.3	0.92	0.15	4.2
Campos K_{cbNDVI}	AVG/Prom	0.19	98.9	0.15	19.5	0.09	7.3	0.04	3.5	0.94	0.15	12.3
Argolo K_{cbNDVI}	AVG/Prom	0.08	2.6	0.12	9.3	0.14	6.8	0.13	12.1	0.93	0.11	8.3
Allen FAO-56 K_{cbNDVI}	AVG/Prom	0.21	121.3	0.14	12.8	0.18	15.5	0.13	11.9	0.94	0.16	6.1
Glez-Dugo K_{cbSAVI}	Moda	0.12	52.8	0.14	13.6	0.19	14.7	0.20	18.5	0.95	0.15	16.0
Glez-Piqueras K_{cbSAVI}	Moda	0.43	285.3	0.33	50.9	0.27	23.1	0.30	27.9	0.95	0.34	49.5
Argolo K_{cbSAVI}	Moda	0.08	22.2	0.10	9.1	0.12	8.2	0.06	5.2	0.95	0.10	7.2

MCT = measure of central tendency; AVG = average; R² = coefficient of determination (dimensionless); MSE = Mean squared error (dimensionless); ARE = average relative error (%); n = number of observations (satellite images used); $K_{cb\ ini}$ = initial basal crop coefficient; $K_{cb\ dev}$ = developmental basal crop coefficient; $K_{cb\ mid}$ = mean basal crop coefficient; $K_{cb\ fin}$ = final basal crop coefficient; $K_{cb\ cycle}$ = cycle basal crop coefficient.

MTC = medida de tendencia central; Prom = promedio; R² = coeficiente de determinación (adimensional); CME = cuadrado medio del error (adimensional); ERP = error relativo promedio (%); n = número de observaciones (imágenes satelitales utilizadas); $K_{cb\ ini}$ = coeficiente de cultivo basal inicial; $K_{cb\ des}$ = coeficiente de cultivo basal de desarrollo; $K_{cb\ med}$ = coeficiente de cultivo basal medio; $K_{cb\ fin}$ = coeficiente de cultivo basal final; $K_{cb\ cycle}$ = coeficiente de cultivo basal del ciclo.

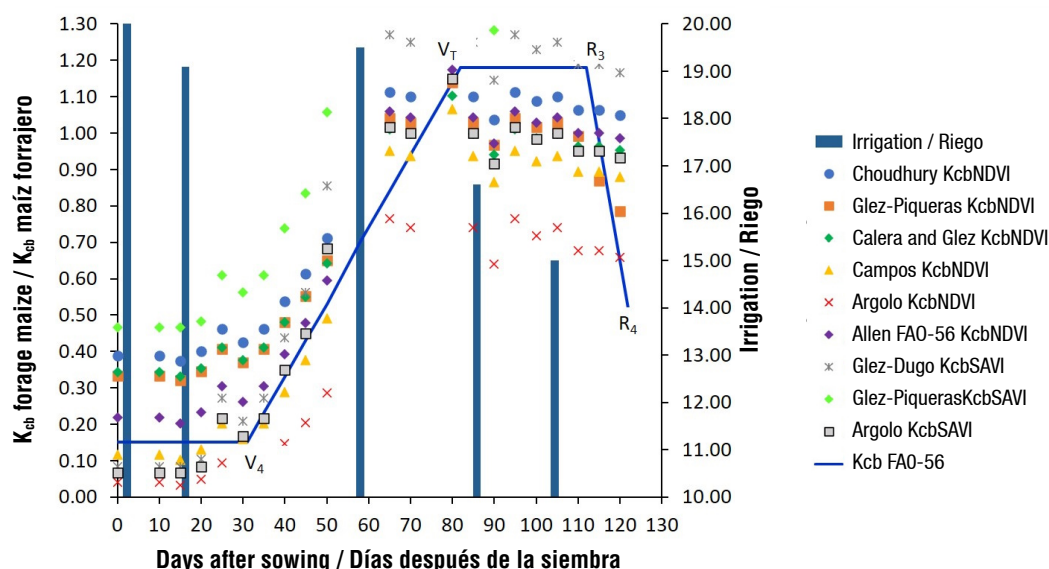


Figure 3. Distribution of K_{cb} estimated by the algorithms used and the K_{cb} obtained from the FAO-56 Manual of forage maize grown in Plot 1.

Figura 3. Distribución del K_{cb} estimado por los algoritmos utilizados y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 del maíz forrajero establecido en la Parcela 1.

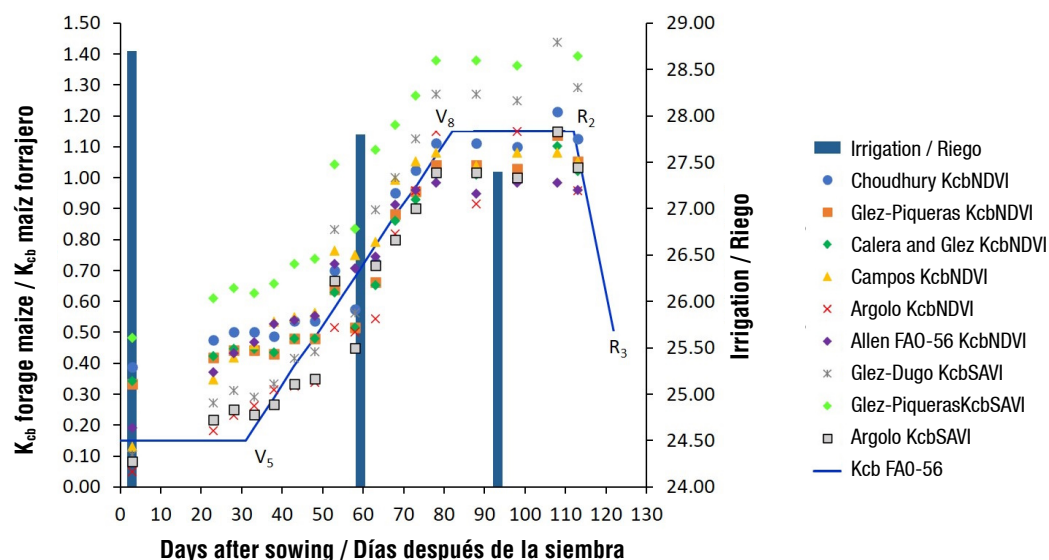


Figure 4. Distribution of the K_{cb} estimated by the algorithms used and the K_{cb} obtained from the FAO-56 Manual of forage maize grown in Plot 2.

Figura 4. Distribución del K_{cb} estimado por los algoritmos utilizados y el K_{cb} obtenido del Manual FAO-56 del maíz forrajero establecido en la Parcela 2.

the vegetative cycle of the crop, which were distributed in a pre-sowing or aniego irrigation, and four auxiliary irrigations applied at 19, 58, 87 and 105 DAS, with an accumulated gross irrigation lamina of 93.4 cm (Figure 3).

In Plot 2 it is observed that most of the algorithms overestimated K_{cb} at the $K_{cb\ ini}$ stage from 22 to 285 %, and at the $K_{cb\ dev}$ stage they overestimated K_{cb} from 2 to 51 %. In contrast, at the $K_{cb\ mid}$ stage most algorithms

valor de CME fue con Choudhury K_{cbNDVI} . Sin embargo, al considerar todo el ciclo de cultivo del maíz, el algoritmo Argolo K_{cbSAVI} es el que presentó menor valor de CME, pero el algoritmo Argolo K_{cbNDVI} presentó valores menores al 13 % de ERP en las cuatro etapas de crecimiento del maíz, y 8.3 % de ERP en todo el ciclo de cultivo, con lo cual se obtiene una precisión de 91.7 %.

El algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó los menores valores de ERP en las dos parcelas de estudio, tanto

underestimated K_{cb} from 1 to 16 %, and in the $K_{cb\text{ fin}}$ stage they underestimated K_{cb} from 3 to 12 %. In this plot, three irrigations were applied during the cycle: one pre-sowing and two auxiliary irrigations at 55 and 82 DAS, with an accumulated gross water table of 83.8 cm (Figure 4).

In general, it was observed that in the two study plots the algorithms used had a lower adjustment in the initial and final periods of the crop. This is because the crop cover values are lower and soil evaporation, not considered by K_{cb} , has a greater effect (Allen et al., 2006), so there is greater variation in the daily values of $K_{cb\text{ ini}}$ and $K_{cb\text{ fin}}$ depending on the water status of the surface soil layer (Rocha et al., 2011).

Figures 5 and 6 show the K_{cb} maps generated with the Campos $K_{cb\text{NDVI}}$ algorithm in the two study plots at pixel scale. This algorithm had the best statistical indices when comparing the estimated K_{cb} with the K_{cb} from tables in the FAO-56 Manual. Plot 1 showed a K_{cb} variation from 0.13 to 0.32 in the initial stage (Julian day 77), from 0.25 to 0.59 in the development stage (Julian day 107), from 0.82 to 1.05 in the middle stage (Julian day 142) and from 0.77 to 0.96 in the final stage (Julian day 172) (Figure 5).

por etapa de crecimiento como en la totalidad del ciclo vegetativo, con excepción de las etapas $K_{cb\text{ ini}}$ y $K_{cb\text{ des}}$ de la Parcela 2. Así, este algoritmo es confiable para estimar el K_{cb} del maíz forrajero con diferente manejo del riego superficial.

En las Figuras 3 y 4 se muestra la distribución del K_{cb} calculado y el K_{cb} reportado en el Manual FAO-56 del crecimiento del cultivo. En la Parcela 1 se observa que en las etapas $K_{cb\text{ ini}}$ y $K_{cb\text{ des}}$ del cultivo la mayoría de los algoritmos sobreestiman el K_{cb} . En la etapa $K_{cb\text{ ini}}$ los algoritmos sobreestiman el K_{cb} de 60 a 239 %, y en la etapa $K_{cb\text{ des}}$ sobreestiman el K_{cb} de 10 a 69 %. Por el contrario, en la etapa $K_{cb\text{ med}}$ la mayoría de los algoritmos subestiman el K_{cb} de 4 a 40 %, y en la etapa $K_{cb\text{ fin}}$ la mayoría sobreestiman el K_{cb} de 2 a 60 %. Se aplicaron cinco riegos en todo el ciclo vegetativo del cultivo, los cuales se distribuyeron en un riego de presembrado o aniego, y cuatro riegos de auxilio aplicados a los 19, 58, 87 y 105 dds, con una lámina de riego bruta acumulada de 93.4 cm (Figura 3).

En la Parcela 2 se observa que la mayoría de los algoritmos sobreestiman el K_{cb} en la etapa $K_{cb\text{ ini}}$ de 22 a 285 %, y en la etapa $K_{cb\text{ des}}$ sobreestiman el K_{cb} de

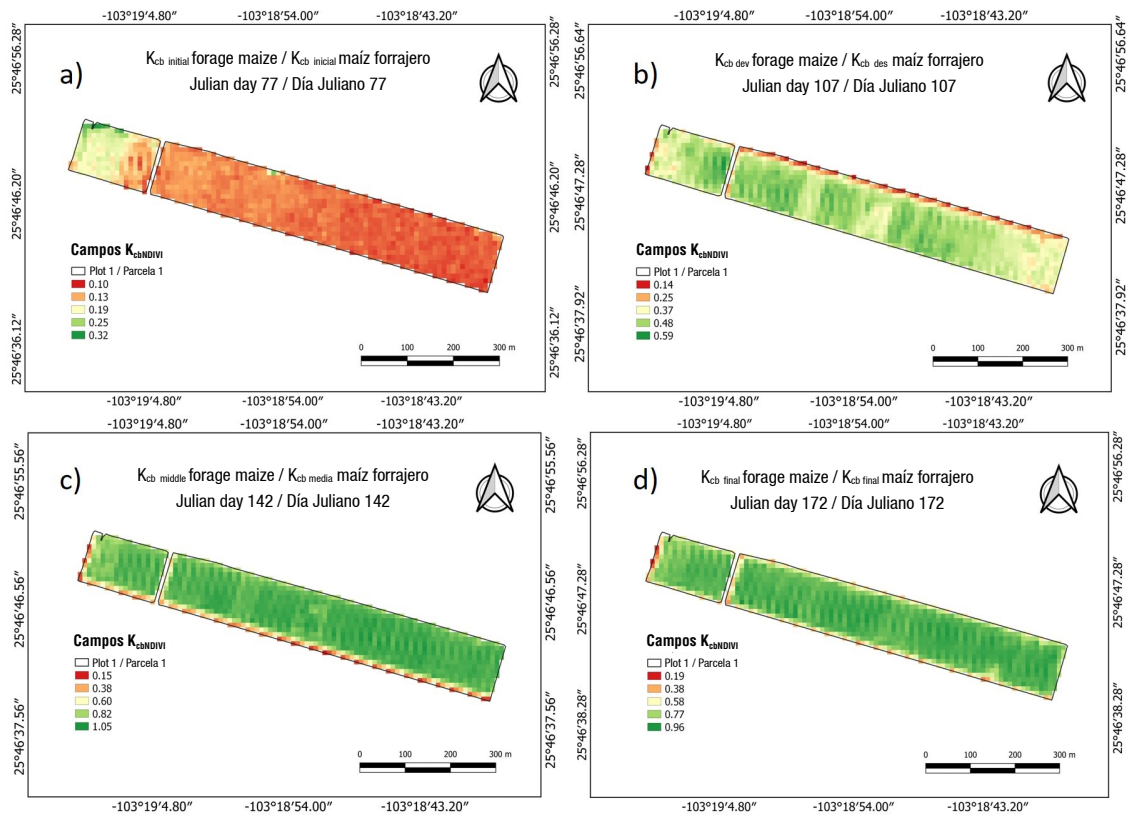


Figure 5. Spatial and temporal distribution of K_{cb} of forage maize grown in Plot 1 in the stages: a) initial (77 Julian day), b) development (107 Julian day), c) middle (142 Julian day) and d) final (172 Julian day).

Figura 5. Distribución espacial y temporal del K_{cb} del maíz forrajero establecido en la Parcela 1 en las etapas: a) inicial (77 día juliano), b) desarrollo (107 día juliano), c) media (142 día juliano) y d) final (172 día juliano).

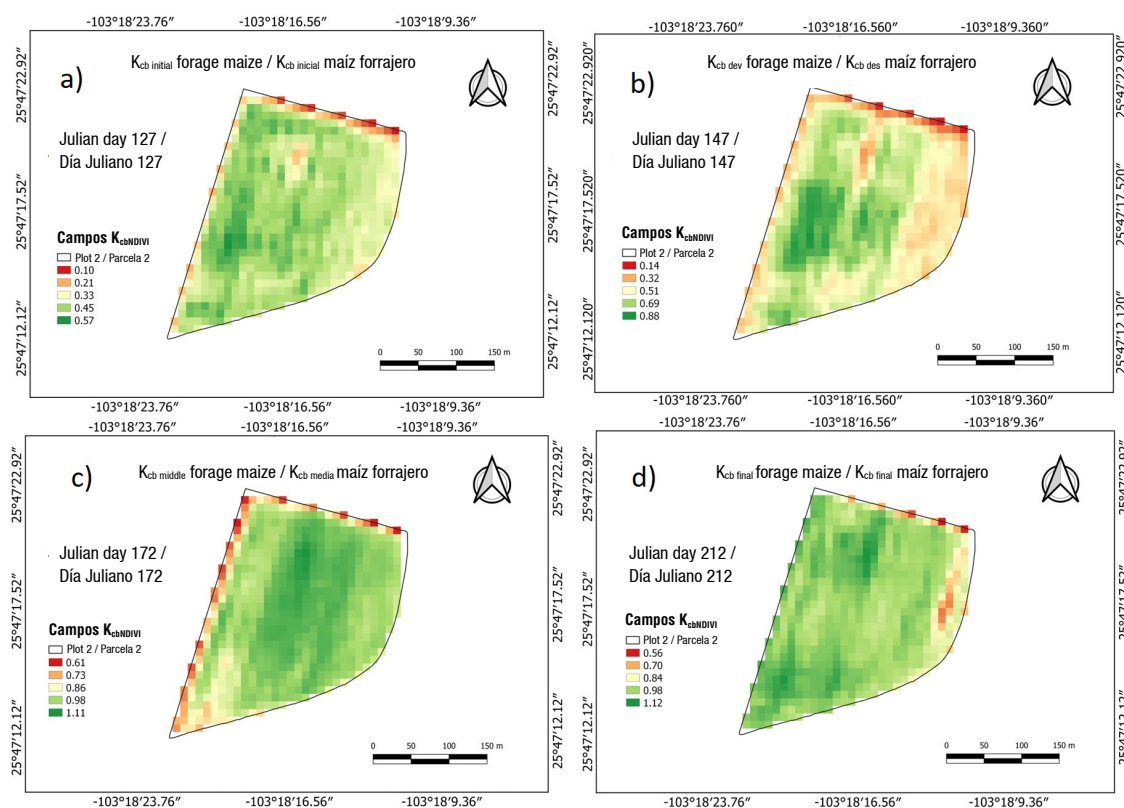


Figure 6. Spatial and temporal distribution of K_{cb} of forage maize grown in Plot 2 in the stages: a) initial (127 Julian day), b) development (147 Julian day), c) average (172 Julian day) and d) final (212 Julian day).

Figura 6. Distribución espacial y temporal del K_{cb} del maíz forrajero establecido en la Parcela 2 en las etapas: a) inicial (127 día juliano), b) desarrollo (147 día juliano), c) media (172 día juliano) y d) final (212 día juliano).

Plot 2 had K_{cb} variations from 0.33 to 0.57 in the initial stage (Julian day 127), from 0.32 to 0.88 in the development stage (Julian day 147), from 0.86 to 1.11 in the middle stage (Julian day 172) and from 0.70 to 1.12 in the final stage (Julian day 212) (Figure 6). It is observed that Plot 2 had greater variation in K_{cb} values in all growth stages of forage maize. This could be due to factors such as crop type (hybrid), soil texture, irrigation management or microclimate, individually or in combination. The maps allow to identify areas with irrigation stress or poor nutrition, irrigation system malfunction or other environmental stress (Knipper et al., 2019).

The K_{cb} estimated by the Campos K_{cbNDVI} algorithm were similar to those reported by Gao et al. (2009) in two maize growth stages (initial and mid), with values from 0.36 to 0.37 in the $K_{cb\ ini}$ stage, from 1.18 to 1.19 in the $K_{cb\ mid}$ stage and from 0.22 to 0.28 in the $K_{cb\ fin}$ stage. The values of the last stage were different from those reported in this study, since the first K_{cb} values concern maize for grain. Ojeda et al. (2006) obtained K_c values, using a model based on accumulated DDD, from 0.05 to 0.3 in emergence (V_E), from 0.4 to 0.45 in

2 a 51 %. En contraste, en la etapa $K_{cb\ med}$ la mayoría de los algoritmos subestimaron el K_{cb} de 1 a 16 %, y en la etapa $K_{cb\ fin}$ subestimaron el K_{cb} de 3 a 12 %. En esta parcela se aplicaron tres riegos durante el ciclo: uno de presembrado y dos de auxilio a los 55 y 82 dds, con una lámina de riego bruta acumulada de 83.8 cm (Figura 4).

De manera general, se observó que en las dos parcelas de estudio los algoritmos utilizados tuvieron un menor ajuste en los períodos inicial y final del cultivo. Lo anterior se debe a que los valores de cobertura del cultivo son menores y la evaporación del suelo, no contemplada por el K_{cb} , tiene mayor efecto (Allen et al., 2006), por lo que existe mayor variación en los valores diarios de $K_{cb\ ini}$ y $K_{cb\ fin}$ dependiendo del estado hídrico de la capa superficial del suelo (Rocha et al., 2011).

En las Figuras 5 y 6 se presentan los mapas de K_{cb} generados con el algoritmo Campos K_{cbNDVI} en las dos parcelas de estudio a escala de pixel. Dicho algoritmo presentó los mejores índices estadísticos al comparar los K_{cb} estimados con los K_{cb} de tablas del Manual FAO-56. En la Parcela 1 se observó una variación del K_{cb} de 0.13 a 0.32 en la etapa inicial (día juliano 77), de 0.25 a

vegetative stage with four leaves (V_4), from 1 to 1.12 in panicle stage (V_T), from 1.15 to 1.25 in reproductive stage with stigmas appearance (R_1), from 1.1 to 1.2 in reproductive stage with granulation (R_2), from 1 to 1.1 in reproductive stage with milky grain (R_3) and from 0.8 to 1 in reproductive stage with doughy grain (R_4). Reyes-González et al. (2019) found K_{cb} values of 0.22 to 0.40 at the $K_{cb\ ini}$ stage, 1.00 at the $K_{cb\ mid}$ stage and 0.80 at the $K_{cb\ fin}$ stage, in the same study area.

The K_{cb} derived from the spectral information of the Sentinel-2 images are independent from the parameters of time, sowing day and effective coverage, and represent the evolution of crops in quasi-real time. Hereby, the difference corresponds only to the time lapse in collecting the satellite imagery and processing the information (1-2 days), which facilitates irrigation scheduling in a large region, since neither sowing dates nor assumed effective coverage are required (Rocha et al., 2011).

Conclusions

The use of spectral information from the red and near infrared bands recorded in Sentinel-2 satellite imagery is a viable and adequate alternative to the FAO-56 Manual method for calculating the basal crop coefficient (K_{cb}) of forage maize. In addition, by combining the use of this technology with the collection of information in the field, it is possible to analyze its behavior more precisely and make more accurate estimates, as specific information is available for the crop cycle and study site. This makes it possible to monitor its evolution in quasi-real time and, consequently, to schedule irrigation in a convenient way in time and space, thus increasing the efficiency of water use.

The Campos K_{cbNDVI} algorithm had the best accuracies for estimating the K_{cb} of forage maize in the two different conditions of field irrigation, both in its growth stages and in its entire crop cycle, obtaining an average accuracy of 88 %.

Acknowledgments

Thanks to the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the funding of the first author's doctoral studies (Grant No. 765686) and to the Laboratorio de Gis Agua y Suelo del CENID-RASPA INIFAP for providing access to its equipment and facilities to obtain field data.

0.59 en la etapa desarrollo (día juliano 107), de 0.82 a 1.05 en la etapa media (día juliano 142) y de 0.77 a 0.96 en la etapa final (día juliano 172) (Figura 5).

Por su parte, la Parcela 2 presentó variaciones del K_{cb} de 0.33 a 0.57 en la etapa inicial (día juliano 127), de 0.32 a 0.88 en la etapa de desarrollo (día juliano 147), de 0.86 a 1.11 en la etapa media (día juliano 172) y de 0.70 a 1.12 en la etapa final (día juliano 212) (Figura 6). Se observa que la Parcela 2 presentó mayor variación de los valores de K_{cb} en todas las etapas de crecimiento del maíz forrajero. Esto se pudo deber a factores como el tipo de cultivo (híbrido), la textura del suelo, el manejo de riego o el microclima, de manera individual o combinada. Los mapas permiten identificar áreas con estrés por riego o nutrición deficiente, mal funcionamiento en el sistema de riego u otro estrés ambiental (Knipper et al., 2019).

Los K_{cb} estimados por el algoritmo Campos K_{cbNDVI} fueron similares a los reportados por Gao et al. (2009) en dos etapas de crecimiento del maíz (inicial y media), al presentar valores de 0.36 a 0.37 en la etapa $K_{cb\ ini}$, de 1.18 a 1.19 en la etapa $K_{cb\ med}$ y de 0.22 a 0.28 en la etapa $K_{cb\ fin}$. Los valores de la última etapa fueron diferentes a los reportados en este estudio, ya que los primeros valores de K_{cb} conciernen al maíz para grano. Ojeda et al. (2006) obtuvieron valores de K_c , mediante un modelo basado en GDD acumulado, de 0.05 a 0.3 en emergencia (V_E), de 0.4 a 0.45 en etapa vegetativa con cuatro hojas (V_4), de 1 a 1.12 en etapa de panojamiento (V_T), de 1.15 a 1.25 en etapa reproductiva con aparición de estigmas (R_1), de 1.1 a 1.2 en etapa reproductiva con granulación (R_2), de 1 a 1.1 en etapa reproductiva con grano lechoso (R_3) y de 0.8 a 1 en etapa reproductiva con grano masoso (R_4). Reyes-González et al. (2019) encontraron valores de K_{cb} de 0.22 a 0.40 en la etapa $K_{cb\ ini}$, de 1.00 en la etapa $K_{cb\ med}$ y de 0.80 en la etapa $K_{cb\ fin}$, en la misma área de estudio.

Los K_{cb} derivados de la información espectral de las imágenes Sentinel-2 son independientes de los parámetros de tiempo, día de siembra y cobertura efectiva, y representan la evolución de los cultivos en tiempo *cuasi* real. En este caso, la diferencia corresponde únicamente al lapso en la obtención de las imágenes de satélite y el procesamiento de la información (1-2 días), lo cual facilita la programación del riego en una región grande, ya que no se requieren fechas de siembra ni cobertura efectiva supuesta (Rocha et al., 2011).

Conclusiones

El uso de información espectral, de las bandas roja e infrarroja cercana, registrada en las imágenes del satélite Sentinel-2 es una alternativa factible y

End of English version

References / Referencias

- Alfieri, J. G., Anderson, M. G., Kustas, W. P., & Cammalleri, C. (2017). Effect of the revisit interval and temporal upscaling methods on the accuracy of remotely sensed evapotranspiration estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 83-98. <https://doi.org/10.5194/hess-21-83-2017>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Riego y Drenaje Manual 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Argolo, S. R., Chartuni, M. E., Filgueiras, R., Fernandes-Filho, E. I., Barbosa da Silva, A. C., & Venancio, L. P. (2020). Actual evapotranspiration and biomass of maize from a red-green-near-infrared (RG NIR) sensor on board an unmanned aerial vehicle (UAV). *Water*, 12(9), 2359. <https://doi.org/10.3390/w12092359>
- Arreola, J., Vega, C., Navarro, E., & Burciaga, G. (2016). Foraging potentials for hybrids of maize (*Zea mays* L.) in the Lagoon Region. *Agronomy Mesoamerican*, 7(2), 88-92. <https://doi.org/10.15517/am.v7i2.24778>
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira-Sandoval, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Land use classification from Sentinel-2 imagery. *Revista de Teledetección*, 48, 55-66. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>
- Calera, A., & González-Piqueras, J. (2007). *Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal: relaciones operativas para obtención de mapas de estos parámetros desde las imágenes de satélite*. Ciudad Real, España: Grupo de Teledetección, Universidad Castilla la Mancha.
- Campos, I., Neale, C. M., Calera, A., Balbontín, C., & González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98(1), 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011>
- Candiago, S., Remondino, F., de Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026-4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>
- Chaudhary, S. K., & Srivastava, P. K. (2021). Future challenges in agricultural water management. In Srivastava, P., Gupta, M., Tsakiris, G., & Quinn, N. W. (Eds), *Agricultural Water Management* (pp. 445-456). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812362-1.00021-7>
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Daughtry, C. S. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1-17. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90090-6)
- Escarabajal-Henarejos, D., Molina-Martínez, J. M., Fernández-Pacheco, D. G., Cavas-Martínez, F., & García-Mateos, G. (2015). Digital photography applied to irrigation adecuada al método del Manual FAO-56 para calcular el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) del maíz forrajero. Además, al combinar el uso de esta tecnología con el levantamiento de información en campo, es posible analizar su comportamiento con mayor detalle y realizar estimaciones más precisas, ya que se cuenta con información específica para el ciclo de cultivo y sitio de estudio. Esto permite dar seguimiento a su evolución en tiempo *cuasi* real y, en consecuencia, realizar la programación del riego en forma oportuna en tiempo y espacio, con lo cual incrementa la eficacia de uso del agua.
- El algoritmo Campos K_{cbNDVI} presentó las mejores precisiones para estimar el K_{cb} del maíz forrajero en las dos diferentes condiciones del riego parcelario, tanto en sus etapas de crecimiento, como en la totalidad de su ciclo de cultivo, al obtener una precisión promedio de 88 %.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de los estudios de doctorado del primer autor (Beca No. 765686) y al Laboratorio de Gis Agua y Suelo del CENID-RASPA INIFAP por el acceso a su equipo e instalaciones para la obtención de datos de campo.

Fin de la versión en español

management of Little Gem lettuce. *Agricultural Water Management*, 151, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.009>

Gao, Y., Duan, A., Sun, J., Li, F., Liu, Z., Liu, H., & Liu, Z. (2009). Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. *Field Crops Research*, 111(1-2), 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.007>

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>

González-Castañeda, F., Peña-Ramos, A., Núñez-Hernández, G., & Jiménez-González, C. A. (2005). Efecto de la densidad y altura de corte en el rendimiento y calidad del forraje de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(4), 393-397. <https://doi.org/10.35196/rfm.2005.4.393>

González-Dugo, M. P., Neale, C. M., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., & Li, F. (2009). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11), 1843-1853. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>

González-Piqueras, J., Rubio, E., Calera, A., Cuesta, G. A., Moratalla, A., & Gilabert, M. A. (2005). Seguimiento

- de la evapotranspiración mediante los coeficientes de cultivo desde teledetección. Aplicación a maíz y trigo. *XI Congreso Nacional de Teledetección, septiembre 2005*, 81-84. <http://www.aet.org.es/congresos/xi/ten14.pdf>
- Hou, P., Liu, Y., Ruizhi, X., Ming, B., Ma, D., Li, S., & Mei, X. (2014). Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Research*, 158, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.021>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Kirk, K., Andersen, H. J., Thomsen, A. G., Jørgensen, J. R., & Jørgensen, R. N. (2009). Estimation of leaf area index in cereal crops using red-green images. *Biosystems Engineering*, 104(3), 308-317. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.07.001>
- Knipper, K. R., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Hain, C. R., Gao, F., Yang, Y., McKee, L. G., Nieto, H., Hipps, L. E., Alsina, M. M., & Sánchez, L. (2019). Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards. *Irrigation Science*, 37, 431-449. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0591-y>
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., & Champagne C. (2015). Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 235-248. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.002>
- Lizarazo-Salcedo, I. A., & Alfonso-Carvajal, O. A. (2011). Aplicaciones de la agricultura de precisión en palma de aceite (*Elaeis Guineensis*) e híbrido OxG. *Revista de Ingeniería*, 33, 124-130. <https://doi.org/10.16924/revinge.33.12>
- López-Urrea, R., Olalla, F. M., Montoro, A., & López-Fuster, P. (2009). Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 96(6), 1031-1036. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.004>
- Mhaweji, M., Nasrallah, A., Abunnasr, Y., Fadel, A., & Faour, G. (2021). Better irrigation management using the satellite-based adjusted single crop coefficient (aKc) for over sixty crop types in California, USA. *Agricultural Water Management*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107059>
- Montemayor-Trejo, J. A., Olague-Ramírez, J., Fortis-Hernández, M., Sam-Bravo, R., Leos-Rodríguez, J. A., Salazar-Sosa, E., Castruita-López, J., Rodríguez-Ríos, J. C., & Chavarría-Galicia, J. A. (2007). Consumo de agua en maíz forrajero con riego subsuperficial. *Terra Latinoamericana*, 2(25), 163-168. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325208>
- Montemayor-Trejo, J. A., Lara-Mireles, J. L., Woo-Reza, J. L., Munguía-López, J., Rivera-González, M., & Trucíos-Caciano, R. (2012). Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango México. *Agrociencia*, 3(46), 267-278. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30223119006>
- Neale, C. M., Bausch, W. C., & Heermann, D. F. (1989). Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 32(6), 1891-1900. <https://doi.org/10.13031/2013.31240>
- Núñez-Hernández, G., Contreras, E. F., & Faz-Contreras, R. (2003). Características agronómicas y químicas importantes en híbridos de maíz para forraje con alto valor energético. *Técnica Pecuaria en México*, 41(1), 37-48. https://redib.org/Record/oai_articulo1205040-caracter%C3%ADsticas-agron%C3%B3micas-y-qu%C3%ADmicas-importantes-en-h%C3%ADbridos-de-ma%C3%ADz-para-forraje-con-alto-valor-energ%C3%A9tico
- Núñez-Hernández, G., Faz-Contreras, R., González-Castañeda, F., & Peña-Ramos, A. (2005). Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. *Técnica Pecuaria en México*, 43(1), 69-78. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61343107>
- Odi-Lara, M., Paz-Pellat, F., López-Urrea, R., & González-Piqueras, J. (2013). Definición de la etapa de desarrollo de los cultivos para estimar evapotranspiración usando la metodología FAO-56 y sensores remotos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(3), 87-102. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300005&lng=es&tln=es
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., & Unland, W. H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13-25. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952006000100013
- Qgis (Long Term Release). (2020). *Software for Geographic Information System, version 3.10.6 LTR*. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/es/site/forusers/alldownloads.html>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Reyes-González, A., Reta-Sánchez, D. G., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., Rodríguez-Hernández, K., & Preciado-Rangel, P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 279-290. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Reyes-González, A., Zavala-Borrego, F., de Paul, V., Cano-Rios, P., & Rodríguez-Moreno, V. M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial

- hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 407-420. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2294>
- Rocha, J., Perdigo, A., Melo, R., & Henriques, C. (2011). Remote sensing based crop coefficients for water management in agriculture. In: Curkovic, S. (Ed), *Sustainable development*. <https://doi.org/10.5772/48561>
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. *Journal NASA/GSFC*, 371. <https://www.scienceopen.com/document?vid=552915b6-e5b6-40e1-932d-295ec6c82801>
- Rukhovich, D. I., Rukhovich, A. D., Rukhovich, D. D., Simakova, M. S., Kulyanitsa, A. L., Bryzzhev, A. V., & Koroleva, P. V. (2016). Maps of averaged spectral deviations from soil lines and their comparison with traditional soil maps. *Eurasian Soil Science*, 49, 739-756. <https://doi.org/10.1134/S1064229316070085>
- Song, L., Jin, J., & He, J. (2019). Effects of severe water stress on maize growth processes in the field. *Sustainability*, 11(18), 5086. <http://dx.doi.org/10.3390/su11185086>
- Snyder, R. (1985). Hand calculating degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35(1-4), 353-358. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(85)90095-4)
- Wright, J. L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(2), 57-74. <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/382>
- Zhu, P., & Burney, J. (2022). Untangling irrigation effects on maize water and heat stress alleviation using satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 827-840, <https://doi.org/10.5194/hess-26-827-2022>