



<https://eqrcode.co/a/yM81OX>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

# Remote Sensing Application to Water Resources Management

## *Aplicación de la teledetección espacial al manejo de los recursos hídricos*

Dr.C. Alberto Méndez-Jocik<sup>I</sup>, Ing. Anett De Jesús Núñez-Pérez<sup>II</sup>, Dr.C. Felicita González-Robaina<sup>III</sup>

<sup>I</sup> Empresa de Proyectos e Ingeniería del Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba.

<sup>II</sup> Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”-CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba.

<sup>III</sup> Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana, Cuba.

**ABSTRACT.** Irrigated agriculture is limited to provide intensive monitoring of water balance in large areas and it allows planning and forecasting the timing of irrigation application at the local level. This process requires having financial, material and human resources not always available. In this environment, evapotranspiration is the fundamental variable in determining water demand and constitutes the critical component of the water and energy balance in climate-soil-vegetation interactions. With the launch of the satellite sensors of the Sentinels Mission as part of the Copernicus Project of the European Space Agency, a new possibility of estimating crop evapotranspiration by combining multispectral images, meteorological information and online databases (Prediction of Worldwide Energy Resource, POWER) in the FAO Penman-Monteith model. The paper presents the first operational results applied to agricultural technologies at local level of evapotranspiration estimation of crops and the water balance for a temporary resolution of one day and a spatial resolution of 10 m. The methodology developed offers promising results by finding consistent and significant relationships in the validation of this with standard procedures.

**Keywords:** Crop Evapotranspiration, multispectral images, temporal resolution, spatial resolution, NDVI.

**RESUMEN.** La agricultura de regadíos está limitada para dar un seguimiento intensivo del balance hídrico en extensas áreas y la posibilidad de planificar y pronosticar el momento de la aplicación riego a nivel local. Este proceso requiere contar con recursos financieros, materiales y humanos no siempre disponibles. Con el lanzamiento de los sensores satelitales de la Misión Sentinels como parte del Proyecto Copérnico de la Agencia Espacial Europea se presenta una nueva posibilidad de la estimación la evapotranspiración de los cultivos combinando imágenes multiespectrales, informaciones meteorológicas y bases de datos en línea (Prediction of Worldwide Energy Resource. POWER) en el modelo FAO Penman-Monteith. En el trabajo se presentan los primeros resultados operacionales aplicados a tecnologías agrarias a nivel local de la estimación de la evapotranspiración de los cultivos y el balance hídrico para una resolución temporal de un día y una resolución espacial de 10 m. La metodología desarrollada ofrece resultados prometedores, al encontrar relaciones consistentes y significativas, en la validación de esta con los procedimientos estándar.

**Palabras clave:** evapotranspiración de los cultivos, imágenes multiespectrales, resolución temporal, resolución espacial, NDVI

### INTRODUCTION

Irrigated agriculture is responsible for the consumption of 60% of the total water used in Cuba (Herrera, 2010). To achieve a rational use of water resources under current conditions, facing

### INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadíos es la responsable del consumo del 60% del agua total utilizada en Cuba Herrera *et al.* (2011), lograr un uso racional de los recursos hídricos en las condiciones

<sup>1</sup> Autor for correspondence: Alberto Méndez-Jocik, e-mail: mendez@enpa.minag.cu

Received: 25/02/2020.

Approved: 04/12/2020.

the impacts of climate change, is one of the greatest challenges imposed on the economy.

In this environment, evapotranspiration is the fundamental variable in determining water demand, and constitutes the critical component of the water and energy balance in climate-soil-vegetation interactions.

Water demand of crops and the possibility of forecasting the time of irrigation application have been limited by the difficulty of accessing estimates of the evapotranspiration of crops. It depends on climate information, which is not always available, the uncertainty in its estimation and the costly task of monitoring the water balance in large areas.

The integration of meteorological information, online databases and spatial remote sensing technologies that provide satellite images at regular intervals, combined with control plots, through a validation and adjustment process, allow monitoring effectively the water balance in large agricultural areas and indicate one of the possible ways to recover the "irrigation forecast" through an advisory service to irrigators.

The products generated can be viewed on a spatial data infrastructure with the availability of current communications from the Ministry of Agriculture in the virtual private network (VPN) and mobile telephony that can generate added value by introducing opportunities for their use in rural environments, bringing knowledge to producers through the transmission online and in real time of the information necessary to estimate the fundamental variables for irrigation management. The objective of the study was to evaluate the alternatives for carrying out the combined water balance of multispectral images and meteorological information and databases in line with the FAO 56 dual coefficient of cultivation methodology.

## MATERIALS AND METHODS

### Study Area

The study is developed in 7 electric irrigation machines of center pivot placed in the southern agricultural areas of Artemisa Province, in the Empresa Agropecuaria Artemisa. It is located between coordinates 22 ° 44'55 "-22 ° 48'23" of North latitude and 82 ° 42'42 "-82 ° 46'04" of West longitude.

The soils are of the typical red Ferrallitic type, moderately deep and deep, with good physical-mechanical properties. The main hydrophysical properties of the soils are presented in Table 1.

actuales, frente a los impactos del cambio climático, es uno de los mayores retos impuestos a la economía.

En este entorno la evapotranspiración es la variable fundamental en la determinación de la demanda hídrica, y constituye el componente crítico del balance de agua y energía en las interacciones clima-suelo-vegetación.

La demanda hídrica de los cultivos y la posibilidad de pronosticar el momento de la aplicación del riego se ha visto limitado por la dificultad de acceder a las estimaciones de la evapotranspiración de los cultivos. La cual depende de informaciones climáticas no siempre disponibles, la incertidumbre en su estimación y la costosa tarea de dar seguimiento al balance hídrico en extensas áreas.

La integración de informaciones meteorológicas, bases de datos en línea y tecnologías de teledetección espacial que proporcionan imágenes satelitales a intervalos regulares, combinadas con parcelas de control, mediante un proceso de validación y ajuste, posibilita hacer efectivo el seguimiento del balance hídrico en extensas áreas agrícolas, e indican una de las posibles vías para la recuperación del "pronóstico de riego" mediante un servicio de asesoramiento al regante.

Los productos generados pueden ser visualizados sobre una infraestructura de datos espaciales con la disponibilidad de las comunicaciones actuales del Ministerio de la Agricultura en la red privada virtual (VPN) y telefonía móvil que puede generar valor añadido al introducir oportunidades de su utilización en entornos rurales, acercando el conocimiento a los productores por medio de la transmisión en línea y tiempo real de la información necesaria para estimar las variables fundamentales para la gestión del riego. El estudio tuvo como objetivo evaluar las alternativas para la realización del balance hídrico combinado de imágenes multiespectrales e informaciones meteorológicas y bases de datos en línea con la metodología FAO-56 de coeficiente dual del cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se localiza en 7 máquinas de riego de pivote central eléctrico en las áreas agrícolas del Sur de la Provincia de Artemisa en la Empresa Agropecuaria Artemisa. Situada entre las coordenadas 22°44'55"-22°48'23" de latitud Norte y los 82°42'42"-82°46'04" de longitud Oeste.

Los suelos son del tipo ferralíticos rojos típicos medianamente profundos y profundos, con buenas propiedades físico-mecánicas. Las principales propiedades hidrofísicas de los suelos se presentan en la Tabla 1.

**Table 1. Hydrophysical properties of the soils of the area**  
**Tabla 1. Propiedades hidrofísicas de los suelos del área (Cid, 2010)**

Prof. (cm)	Cc (g g <sup>-1</sup> )	Da a Cc (g cm <sup>-3</sup> )	Dr (g cm <sup>-3</sup> )	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Pt (%)
0-30	0,338	1,18	2,55	59,17	22,39	18,50	53,71
31-80	0,342	1,21	2,52	64,12	13,78	22,10	52,05
80-100	0,337	1,26	2,48	51,78	23,50	24,71	49,08

### Crop Characteristics

The works were carried out under production conditions, in potato crop, considering the different development phases for Romana variety, planted at different sowing and harvest dates (Table 2).

### Características del cultivo

Los trabajos se realizaron en condiciones de producción, en el cultivo de la papa, considerando las distintas fases de desarrollo para la variedad Romana, plantada en diferentes fechas de siembra y de cosecha (Tabla 2).

**TABLE 2. Information on the crop development phases**  
**TABLA 2. Información de las fases de desarrollo del cultivo**

Name	Area (ha)	Sowing Date	Harvest Date
Monserrate 2	8	January 4, 2017	April 13, 2017
Nena 2	9	December 29, 2016	March 30, 2017
San Justo 1	14,8	November 19, 2016	February 26, 2017
San Justo 3	12	November 25, 2016	March 4, 2017
San León 1	7	December 28, 2016	April 6, 2017

### Methodology Used

Agrometeorological information on maximum temperature, minimum temperature, wind speed and air humidity were obtained online from the site <http://www.insmet.cu/>, solar radiation was obtained from the agro-climatology Nasa POWER model (2018), file available at <https://power.larc.nasa.gov/>, previously calibrated through empirical relationships with databases (2005-2010) of the study area.

### Metodología empleada

Las Informaciones agrometeorológicas de temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad del viento y humedad del aire se obtienen en línea del sitio <http://www.insmet.cu/>, la radiación solar es obtenida del archivo agro-climatología disponible el modelo Nasa POWER NASA (2018) (<https://power.larc.nasa.gov/>), previamente calibrado mediante relaciones empíricas con bases de datos (2005-2010) de la zona de estudio.

### Estimation of the Reference Evapotranspiration (ETo)

The Eto was calculated using the standard procedure, FAO Penman Monteith (Allen et al., 2006), from the meteorological variables: solar radiation, air temperature, relative humidity and wind speed.

FAO 56 dual crop coefficient methodology based on spatial remote sensing.

The most advanced formulation of the FAO 56 procedure incorporates the traditional use of the “single” crop coefficient Kc the so-called “dual” crop coefficient (Allen et al., 2006), which allows the estimation of the crop evapotranspiration as the sum of transpiration or flow of water through the plant, and evaporation from the bare soil fraction. For this, the basal crop coefficient Kcb is introduced, as the quotient between the transpiration of a cover in the absence of stress and the reference evapotranspiration, as well as an evaporative coefficient, Ke, which collects the evaporation from the bare soil.

The ETc estimation for crops in the absence of water stress is carried out by Equations (1), (2) and using the single and dual coefficients, respectively.

$$ETc = Kc \cdot ETo \tag{1}$$

$$ETc = Kc \cdot ETo + Ke \cdot ETo \tag{2}$$

Where:

ETc: Crop evapotranspiration

ETo: Reference evapotranspiration

Kc: Single crop coefficient

Kcb: Basal crop coefficient or Transpiration coefficient

Ke: Soil evaporative coefficient

### Estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo)

La ETo se calculó mediante el procedimiento estándar, FAO Penman Monteith Allen (2006), a partir de las variables meteorológicas de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento.

Metodología FAO-56 de coeficiente dual del cultivo basada en teledetección espacial.

La formulación más avanzada del procedimiento FAO-56 incorpora al tradicional uso de coeficiente de cultivo “único” Kc el denominado coeficiente de cultivo “dual” Allen (2006), el cual permite la estimación de la evapotranspiración del cultivo como la suma de la transpiración, o flujo de agua a través de la planta, y la evaporación desde la fracción de suelo desnuda. Para ello se introduce el coeficiente de cultivo basal Kcb, como el cociente entre la transpiración de una cubierta en ausencia de estrés y la evapotranspiración de referencia, así como un coeficiente evaporativo Ke, que recoge la evaporación desde el suelo desnudo.

La estimación de la ETc para cultivos en ausencia de estrés hídrico se realiza mediante las ecuaciones (1), (2) y usando el coeficiente único y dual, respectivamente:

$$ETc = Kc \cdot ETo \tag{1}$$

$$ETc = Kc \cdot ETo + Ke \cdot ETo \tag{2}$$

donde:

ETc: Evapotranspiración del cultivo

ETo: Evapotranspiración de referencia

Kc: Coeficiente de cultivo “único”

Kcb: Coeficiente de cultivo basal o coeficiente de transpiración

Ke: Coeficiente evaporativo del suelo

The availability of water in the soil is usually the limiting factor in the development of the vegetal covering. When the water content of the soil layer explored by the roots falls below a certain threshold value, the plant cannot extract water at the rate demanded by the plant-atmosphere system, and enters into hydric stress. The appearance of water stress causes different effects on the development of plants: low stress values cause a decrease in vegetative growth, which translates into less leaf growth and development. Higher degrees of stress cause stomata closure and if the degree of stress increases, the leaves can die.

The effect of water stress in the methodology is considered by introducing a stress coefficient  $K_s$ , as indicated in Equation (3). This coefficient  $K_s$  can take values in the range from 0 to 1; A  $K_s$  value equal to 1 indicates the absence of stress, and in this case Equation (3) becomes Equation (2); while a value equal to 0 for  $K_s$  corresponds to maximum stress.

$$ET_c = K_s K_{cb} E_{To} + K_e E_{To} \quad (3)$$

The calculation of the stress coefficient  $K_s$  is defined in the FAO 56 methodology by estimating the water content of the soil layer in which the roots develop through a water balance.

The methodology applied in this work makes use of temporal sequences of multispectral satellite images that allow monitoring the development of crops and estimate the associated irrigation needs (Calera *et al.*, 2016).

### Obtaining Satellite Images

The work used public domain images from the Sentinel 2A space sensors of the European Space Agency (ESA) and Landsat 8 of the North American Space Agency (NASA)

The 18 multispectral image sequences covering the growing season of the crop were downloaded from the United States Geological Survey (USGS) website, Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>), corresponding to scene number column (PATH)=16 and row (ROW)=44 for the study area.

The estimation of the basal crop coefficient  $K_{cb}$  was derived from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

The NDVI is a parameter that is obtained simply and directly from multispectral images through an algebraic combination of reflectivity in red and near infrared. It measures the amount of photosynthetically active chlorophyll from the plant covering that absorbs radiation (Calera *et al.*, 2016).

The NDVI is calculated using expression (4) according to the methodology used by Mulleady *et al.* (2013), Aguirre (2014), Castañeda *et al.* (2015) and Rahimi *et al.* (2015).

$$NDVI = \frac{(ICR - R)}{(ICR + R)}$$

The basal coefficient of the crop, ( $K_{cb}$ ) indicates the transpiration rate of the crop with respect to a potential transpiration rate. The abundant scientific work since Heilman *et al.* (1982) and Neale *et al.* (1987) show the linear relationship that exists between the basal coefficient of the crop (transpiration) and the

La disponibilidad de agua en el suelo suele ser el factor limitante en el desarrollo de la cubierta vegetal. Cuando el contenido en agua de la capa de suelo explorada por las raíces cae por debajo de un cierto valor umbral, la planta no puede extraer agua al ritmo que demanda el sistema planta-atmósfera, y entra en estrés hídrico. La aparición de estrés hídrico causa diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas: valores bajos de estrés causan disminución del crecimiento vegetativo, lo que se traduce en un menor crecimiento y desarrollo de las hojas. Grados de estrés más elevado causan cierre estomático y si el grado de estrés crece, las hojas pueden morir.

El efecto del estrés hídrico en la metodología se considera introduciendo un coeficiente de estrés, tal y como se indica en la ecuación (3). Este coeficiente  $K_s$  puede tomar valores en el rango de 0 a 1; Un valor de  $K_s$  igual a 1 indica ausencia de estrés, y en este caso la ecuación (3) se transforma en la ecuación (2); mientras que un valor igual a 0 para  $K_s$  corresponde a máximo estrés.

$$ET_c = K_s K_{cb} E_{To} + K_e E_{To} \quad (3)$$

El cálculo del coeficiente de estrés  $K_s$  se define en la metodología FAO-56 estimando el contenido de agua de la capa de suelo en la que se desarrollan las raíces a través de un balance de agua.

La metodología aplicada en este trabajo hace uso de secuencias temporales de imágenes satelitales multiespectrales que permiten realizar un monitoreo del desarrollo de los cultivos y estimar las necesidades de riego asociadas (Calera y Campos, 2016).

### Obtención de imágenes satelitales

En el trabajo se utilizaron imágenes de dominio público de los sensores espaciales Sentinel 2A de la Agencia Espacial Europea (ESA) y Landsat 8 de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA).

Las secuencias 18 de imágenes multiespectrales que abarcan el período vegetativo del cultivo fueron descargadas de la página web, Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), correspondientes a la escena de número de columna (PATH)=16 y fila (ROW)=44 para el área de estudio.

Estimación del coeficiente de cultivo basal fue derivado del índice de Vegetación de Diferencias Normalizado vegetación (NDVI).

El NDVI es un parámetro que se obtiene de forma simple y directa desde las imágenes multiespectrales mediante una combinación algebraica de las reflectividades en el rojo e infrarrojo cercano. Mide la cantidad de clorofila fotosintéticamente activa de la cubierta vegetal que absorbe de la radiación (Calera y Campos, 2016).

El NDVI se calcula mediante la expresión (4) según la metodología utilizada por Mulleady y Barrera (2013); Aguirre (2014); Castañeda *et al.* (2015); Rahimi *et al.* (2015).

$$NDVI = \frac{(ICR - R)}{(ICR + R)}$$

donde:

IRC: es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo, en el ancho de banda correspondiente.

El coeficiente basal del cultivo, ( $K_{cb}$ ) indica la tasa de transpiración del cultivo respecto a una tasa de transpiración potencial. Los abundantes trabajos científicos desde Heilman *et al.* (1982) y Neale *et al.* (1990), ponen de manifiesto la relación lineal que existe entre el coeficiente basal del cultivo



vegetation indices, such as the NDVI. This linear relationship has been analyzed for a wide range of crops and natural vegetation in theoretical and experimental works (Campos *et al.*, 2010, Glenn *et al.*, 2011).

The proposed relationship between the value of the  $K_{cb}$  coefficient and the NDVI index, in the methodology used by Espinosa *et al.* (2017) and Calera *et al.* (2016a) is presented in Equation (5) (Campos *et al.*, 2010), for herbaceous crops.

$$K_{cb}=1,25.NDVI+0,1 \quad (5)$$

Where:

$K_{cb}$  is the basal crop coefficient, with values ranging between 0.15 and 1.15 and NDVI is the Normalized Difference Vegetation Index, obtained from multispectral images. Their values range from 0.16 (bare soil) to 0.91 (very dense green coverings).

The sequence of images makes it possible to describe the temporal evolution of the vegetation cover, attending to the specific characteristics of planting and growth and shows the spatio-temporal variability that the different soil and management factors can introduce (Campos *et al.*, 2010).

### Methodology for Estimating the Coefficient ( $K_e$ ), Crop Evapotranspiration ( $E_{Tc}$ ) and the Water Balance in the Soil

The estimation of the evaporation coefficient (Allen *et al.*, 2006) was carried out by daily calculation of the  $K_e$  value by means of a water balance in the soil. The precipitation was introduced and the type of irrigation was designed to estimate the fraction ( $f_e$ ) of the moistened surface of the soil by irrigation or rain.

By multiplying the evaporation coefficient derived from the water balance in the soil by the  $E_{To}$ , the evaporation component of the cultivation coefficient was obtained. The sum of both components estimated the value of  $E_{Tc}$

## RESULTS AND DISCUSSION

### Obtaining the Basal Crop Coefficient $K_b$ Derived from the Vegetation Index (NDVI)

The image sequences derived from the determination of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Figure 3.1) described the evolution of the vegetal covering of one of the electric central pivot machines, used in the study. According to the characteristics of the different phases of crop development for the variety studied, it showed the spatial and temporal variability that the different soil and management factors can introduce.

The behavior of the  $K_{cb}$  responded to the processed values of the NDVI. In the sowing stage, due to the low coverage of the leaf surface, these values were low and as the crop grew and its leaf area index increased, the  $K_{cb}$  values increased until the end of the development phase, which tended to decrease due to the suspension of irrigation and the fall of the evergreen leaves with a decrease in the foliar area due to the formation of the tuber. Table 3 and Figure.2 show the average  $K_{cb}$  values for the crop development phases.

(transpiración) y los índices de vegetación, como el NDVI. Esta relación lineal se ha analizado para una amplia gama de cultivos y vegetación natural en trabajos teóricos y experimentales (Glenn *et al.*, 2011; Campos *et al.*, 2010).

La relación propuesta entre el valor del coeficiente  $K_{cb}$ , y el índice NDVI, en la metodología utilizada por Calera *et al.* (2016) y Espinosa *et al.* (2017), se presenta en la ecuación (5) Campos (2010), para cultivos herbáceos.

$$K_{cb}=1,25.NDVI+0,1 \quad (5)$$

donde:

$K_{cb}$ : es el coeficiente de cultivo basal, con valores que oscilan entre 0,15 y 1,15 y es el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes multiespectrales. Sus valores oscilan desde 0,16 (suelo desnudo) y 0,91 (cubiertas verdes muy densos).

La secuencia de imágenes posibilita describir la evolución temporal de la cubierta vegetal, atendiendo a las características específicas de siembra y crecimiento y muestra la variabilidad espacio-temporal que los distintos factores de suelo y manejo pueden introducir (Campos, 2010).

### Metodología para la estimación del coeficiente de evaporación ( $K_e$ ), evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ) y el balance de agua en el suelo

La estimación del coeficiente de evaporación Allen (2006), se realiza mediante el cálculo diario del valor de  $K_e$  por medio de un balance de agua en el suelo. Introduciendo la precipitación y designando el tipo de riego para estimar la fracción ( $f_e$ ) de la superficie humedecida del suelo por riego o lluvia.

Al multiplicar el coeficiente de evaporación derivado del balance de agua en el suelo por la se obtiene la componente de la evaporación del coeficiente de cultivo. La suma de ambas componentes estima el valor de .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Obtención del coeficiente de cultivo basal $K_b$ derivado del índice de vegetación (NDVI)

En las secuencias de imágenes derivadas de la determinación del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizada (NDVI) (Figura 1) se describe la evolución de la cubierta vegetal de una de las máquinas de pivote central eléctrica, utilizadas en el estudio, atendiendo a las características de las distintas fases de desarrollo del cultivo para la variedad estudiada, se muestra la variabilidad espacial y temporal que los distintos factores de suelo y manejo pueden introducir.

El comportamiento de los  $K_{cb}$  responde a los valores procesados del NDVI. En la etapa de siembra debido a la baja cobertura de la superficie foliar hace que estos valores sean bajos y a medida que el cultivo va creciendo y aumentando su índice de área foliar los valores de  $K_{cb}$  van aumentando hasta el final de la fase de desarrollo que tienden a disminuir por la suspensión del riego y caída de las hojas perennes con una disminución del área foliar por la formación del tubérculo. En la Tabla 3 y Figura 2 se presentan los valores promedios  $K_{cb}$  para las fases de desarrollo del cultivo.

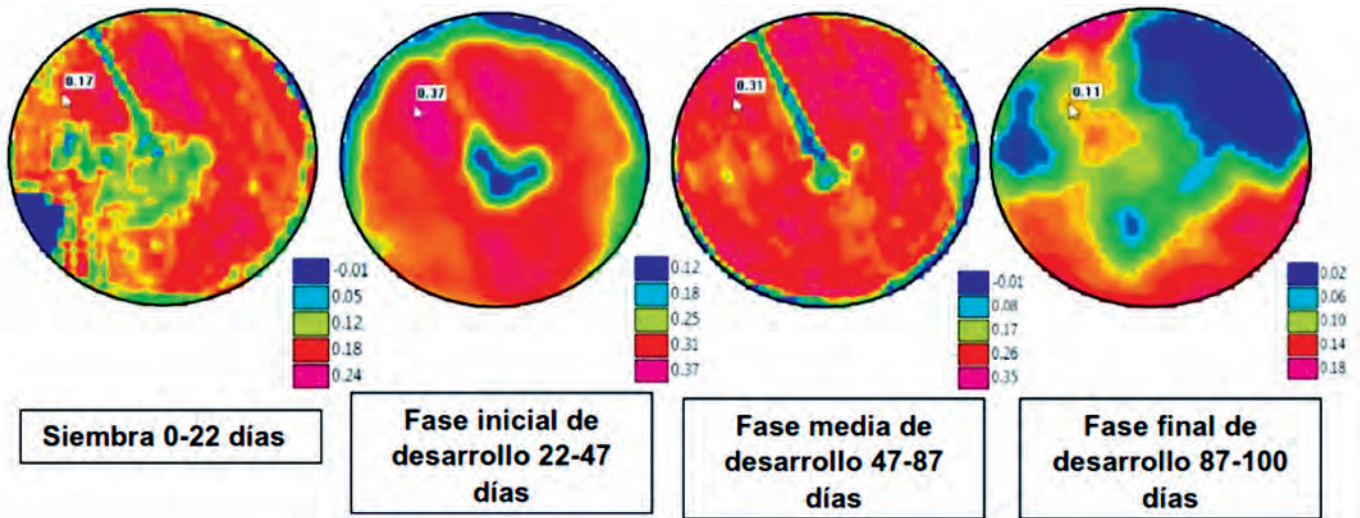


FIGURE 1. NDVI image sequence for the San León machine.  
 FIGURA 1. Secuencia de imágenes del para la máquina San León.

TABLE 3. Basal coefficient of potato, Romano variety  
 TABLA 3. Coeficiente basal de la papa. Variedad Romano

Crop development phases	Days	
Sowing	0-22	0,30
Initial phase of development	22-47	0,60
Middle phase of development	47-87	0,50
Final phase of development	87-100	0,29

The  $K_{cb}$  values derived from NDVI (Romano variety) (Figure 3) showed a similar trend throughout the vegetative cycle with the  $K_c$  values estimated experimentally by Roque (1995), in the Spunta, Desiree and Baraka varieties.

The dual  $K_c$  behavior at the beginning of the crop cycle was mostly affected by solar radiation that increased the evaporative coefficient. At this stage, where vegetation was scarce, as the crop canopy projected more shade on the ground, evaporation decreased and vegetal covering allowed more than 90% of ET to occur as transpiration. (Allen *et al.*, 2006).

Dual  $K_c$  fluctuations were due to soil moisture dynamics. When the soil surface was wet, after irrigation or rain, evaporation in the soil ( $K_e$ ) occurred at a maximum rate and the value of  $K_c$  could not exceed the maximum value. As the soil surface dried up, less moisture was available for evaporation, resulting in reduced evaporation based on the amount of water remaining in the topsoil.

When comparing the results obtained, a correspondence between the estimated dual  $K_c$  and the single reported  $K_c$  (Roque, 1995) with deviations of 0.11 and mean square error of 0.14 was evidenced, which represented a relative error of 4.6% with low dispersions that demonstrated the homogeneity of the data.

The estimation of the cultivation coefficient from satellite images is increasingly used as an operational tool, based on extensive experimental evidence (Allen *et al.*, 2011), (Glenn *et al.*, 2011), which allows generalizing the precise application of the procedure of dual  $K_c$  presented at FAO56.

Los valores de  $K_{cb}$  derivados del NDVI (variedad Romano) (Figura 3) muestran una similar tendencia a lo largo del ciclo vegetativo con los valores de  $K_c$  estimados experimentalmente por Roque (1995), en las variedades Spunta, Desiree y Baraka.

El comportamiento de  $K_c$  dual al inicio del ciclo del cultivo se encuentra afectado mayormente por la radiación solar que aumenta el coeficiente evaporativo, en esta etapa donde la vegetación es escasa, a medida que el dosel del cultivo proyecta más sombra sobre el suelo la evaporación disminuye y la cobertura vegetal permite que más del de 90% de la ET ocurra como transpiración (Allen, 2006).

Las fluctuaciones de  $K_c$  dual se deben a la dinámica de humedad en el suelo. Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia, la evaporación en el suelo ( $K_e$ ) ocurre a una tasa máxima y el valor de  $K_c$  no puede exceder el valor máximo. A medida que la superficie del suelo se va secando, una menor cantidad de humedad estará disponible para la evaporación, lo que provoca una reducción de la evaporación en función de la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo.

Al comparar los resultados obtenidos, se evidencia una correspondencia entre el  $K_c$  dual estimado y  $K_c$  único reportado Roque (1995), con desviaciones de 0,11 y error cuadrático medio de 0,14 que representa un error relativo de 4.6% con dispersiones bajas que demuestran la homogeneidad de los datos.

La estimación del coeficiente de cultivo desde imágenes satelitales aparece cada vez más como una herramienta operativa, basada en una amplia evidencia experimental Allen *et al.* (2011); Glenn *et al.* (2011), que permite generalizar la aplicación precisa del procedimiento de  $K_c$  dual presentado en FAO-56.

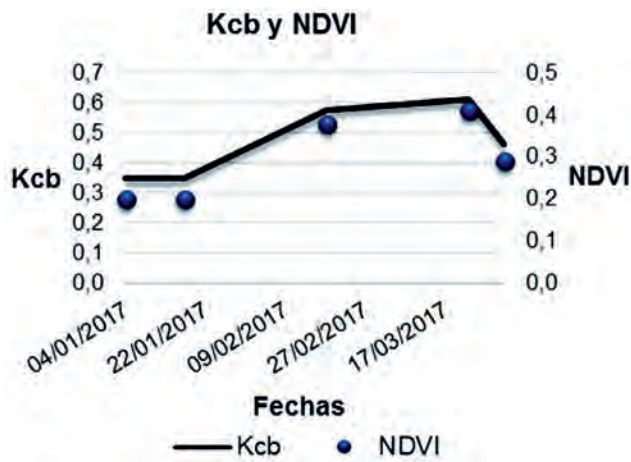


FIGURE 2. Behavior of the NDVI and basal coefficient in the vegetative period  
 FIGURA 2. Comportamiento del NDVI y coeficiente basal en el periodo vegetativo

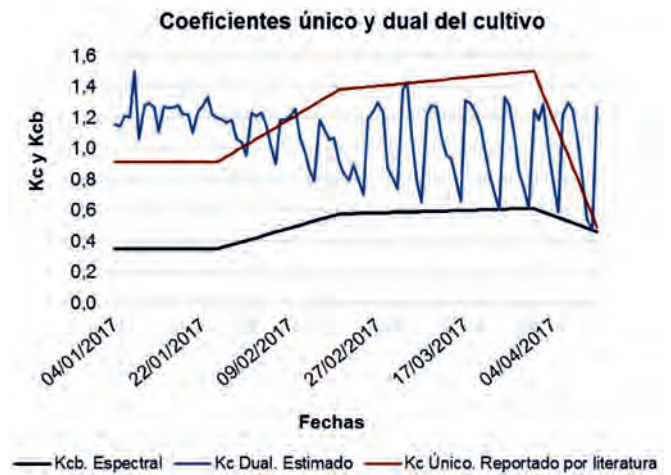


FIGURE 3. Single and dual coefficients of potato cultivation  
 FIGURA 3. Coeficientes único y dual del cultivo de la papa

### Estimation of Crop Evapotranspiration

In Figure 4, an example of the estimation of the crop evapotranspiration for one of the irrigation machines studied is presented, considering the reported single  $K_c$  and the estimated dual  $K_c$ .

### Estimación de la evapotranspiración del cultivo

En la Figura 4 se presenta un ejemplo de la estimación de la evapotranspiración del cultivo para una de las máquinas de riego estudiadas considerando el  $K_c$  único reportado y el  $K_c$  dual estimado.

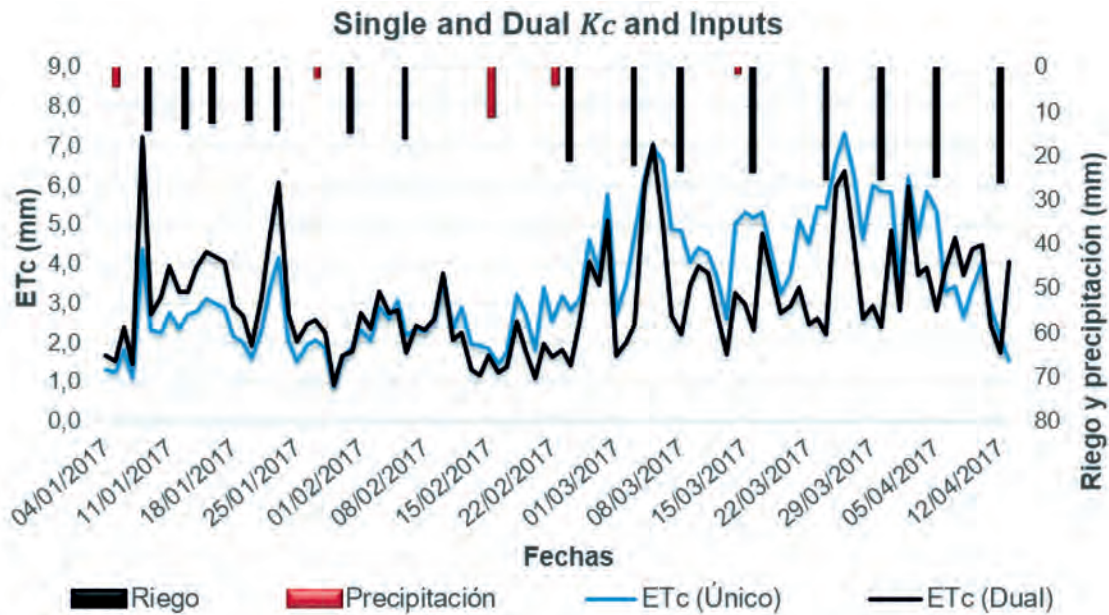


FIGURE 4. Measured  $ET_c$  and estimated  $ET_c$  and moisture inputs  
 FIGURA 4.  $ET_c$  medida y  $ET_c$  estimada e ingresos de humedad.

It is shown that there was an adequate correspondence between the crop evapotranspiration values considering both  $K_c$  with mean deviations of  $0.30 \text{ mm d}^{-1}$  and mean square error of  $1.16 \text{ mm d}^{-1}$ , which represented a 6% relative error.

### Application of the Results by Carrying Out the Water Balance

To evaluate the effects caused by the use of the single  $K_c$  and dual  $K_c$  coefficients, a comparative water balance was carried out for both methods (Table 3.2).

Se muestra que existe una adecuada correspondencia entre los valores de evapotranspiración del cultivo considerando ambos  $K_c$  con desviaciones promedios de  $0,30 \text{ mm d}^{-1}$  y error cuadrático medio de  $1,16 \text{ mm d}^{-1}$  que representa un 6% de error relativo.

### Aplicación de los resultados mediante la realización del balance hídrico

Para evaluar los efectos que provocan la utilización de los coeficientes  $K_c$  único y dual se realiza un balance hídrico comparativo para ambos métodos (Tabla de la 4).



The average water needs estimated through the balance by means of the single  $K_c$  for the potato crop were 25% higher compared to the estimates made for a single dual coefficient, this was due to the fact that the total irrigation norm was higher by 83 mm, accounting for 3 more irrigations. When comparing with the actual exploitation of these irrigation systems, 180 mm more than the irrigation standard were applied, accounted for in the application of 6 average irrigations higher than those reported by the balance.

Hunsaker *et al.* (2005a and b), implemented a model for the calculation of  $ET$  in cotton and wheat crops based on  $ET_0$ ,  $NDVI$  and on a variant of the FAO-56 method that includes the basal coefficient of the crop ( $K_{cb}$ ) and the soil evaporation variable ( $K_e$ ). This method is developed with the objective of carrying out the irrigation programming. The results showed that the FAO-56 method combined with the  $NDVI$  gave more accurate predictions of irrigation demands than the standard FAO-56 method (single  $K_c$ ) which tends to underestimate the irrigation requirements by 10% for a dense crop and for the less dense it overestimates it by 52%. The results were compared with measurements obtained by lysimeters where it was found that the FAO-56  $NDVI$  method estimated the  $ET$  with an error of 5%. That allowed concluding that the use of this method can increase the precision in the water balance.

Allen *et al.* (2006) considers that the dual coefficient procedure is recommended for the cases of irrigation schedules in real time, for calculations of the water balance in the soil, as well as for investigations where the effects of daily variations of the humidification of the soil are important. soil surface and its resulting impact on the daily  $ET_c$  value, such as the wetting pattern of the soil profile and deep percolation fluxes.

Las necesidades hídricas promedios estimadas mediante el balance por medio del único para el cultivo de la papa son un 25% mayores comparadas con las estimaciones realizadas para con un coeficiente único dual, esto se debe a que la norma total de riego es superior en 83 mm, contabilizando 3 riegos más. Al comparar con la explotación real de estos sistemas de riego se aplicaron 180 mm más de norma de riego, contabilizados en la aplicación de 6 riegos promedios superiores a los reportados por el balance.

Hunsaker *et al.* (2005a, 2005b) implementó un modelo para el cálculo de la  $ET$  en cultivos de algodón y trigo basados en la  $ET_0$ ,  $NDVI$  y en una variante del método de la FAO-56 que incluye el coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) y la variable evaporación del suelo ( $K_e$ ). Este método es desarrollado con el objetivo de realizar la programación de riego. Los resultados mostraron que el método FAO-56 combinado con el  $NDVI$  dio predicciones más exactas de las demandas de riego que el método estándar de la FAO-56 ( $K_c$  único) que tiende a subestimar los requerimientos de riego en un 10% para un cultivo denso y para los menos densos lo sobrestima en un 52%. Los resultados fueron comparados con mediciones obtenidas por lisímetros donde se encontró que el método FAO-56  $NDVI$  estimó la  $ET$  con un error de un 5%. Concluyendo que la utilización de este método puede aumentar la precisión en los balances hídricos.

Allen (2006), considera que el procedimiento del coeficiente dual es recomendable para los casos de los calendarios de riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, así como investigaciones donde sean importantes los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante en el valor diario de  $ET_c$ , como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda.

TABLE 4. Example of water balance  
TABLA 4. Ejemplo de balance hídrico

		Average Results			
	Balance elements	UM	single	Dual	Real data
Input	Rain (P)	mm	29,40	29,40	29,40
	Usable rain	mm	24,10	29,40	
	% Usable rain	%	81,90	100,00	
	Irrigation (I)	mm	335	232	442
	Total input		<b>359</b>	<b>261</b>	
Output	Crop evapotranspiration ( $ET_c$ )	mm	308	281	
	Drainage losses	mm	6	0,00	
	Total output		<b>314</b>	<b>281</b>	
	Number of irrigations		17	14	20

## CONCLUSIONS

- The integration of meteorological information, online databases and temporal sequences of multispectral images of the Sentinel 2A and Landsat 8 space sensors to estimate the dual coefficient of the crop in FAO 56 methodology, allows the estimation of the evapotranspiration of crops and the realization of the combined water balance.
- The procedure developed after validation with direct methods, makes it possible to monitor the water balance in

## CONCLUSIONES

- La integración de las informaciones meteorológicas, bases de datos en línea y secuencias temporales de imágenes multiespectrales de los sensores espaciales Sentinel 2A y Landsat 8 para estimar el coeficiente dual del cultivo en metodología FAO 56, permite la estimación de la evapotranspiración de los cultivos y la realización del balance hídrico combinado.
- El procedimiento desarrollado previa validación con métodos directos, permite hacer efectivo el seguimiento del



extensive agricultural areas as one of the possible ways to recover the “irrigation forecast” through an advisory service to the irrigator.

balance hídrico en extensas áreas agrícolas como una de las posibles vías para la recuperación del “pronóstico de riego” mediante un servicio de asesoramiento al regante.

## REFERENCES

- AGUIRRE, R.A.: *Estimación de la evapotranspiración mediante imágenes satelitales en la cuenca del río La Sierra, Chiapas y Tabasco, México*, Colegio de Postgraduados, Maestro en Ciencias, Especialista en Hidrociencias, Estado de México, México, 2014.
- ALLEN, G.R.: *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Ed. Food & Agriculture Org. FAO, Segunda ed., vol. Riego y Drenaje No. 56, vols. 1, Roma, Italia, 298 p., 2006, ISBN: 92-5-304219-2.
- ALLEN, G.R.; PEREIRA, S.L.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E.: “Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy”, *Agricultural Water Management*, 98(6): 899-920, 2011, ISSN: 0378-3774.
- CALERA, A.; CAMPOS, I.: *Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos, [en línea]*, Inst. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Intihuasi, Boletín INIA N°335, La Serena, Chile, 50 p., 2016, Disponible en: <https://es.scribd.com/document/359609424/ABC>.
- CALERA, A.; CAMPOS, I.; GARRIDO, J.: *Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales*, Inst. Sección de Teledetección y SIG. Universidad Castilla La Mancha, España, 2016.
- CAMPOS, I.: *Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain, Remote sensing and hydrology*, Inst. IAHS, Jackson Hole (WY), USA, 397-400 p., 2010.
- CAMPOS, I.; CALERA, A.; BALBONTIN, C.; TORRES, A.E.; GONZÁLEZ, P.J.: *Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain*, Ed. IAHS, Remote sensing and hydrology ed., Jackson Hole (WY), USA, 397-400 p., 2012, ISBN: 1-907161-27-9.
- CASTAÑEDA, I.C.R.; MARTÍNEZ, M.M.; PASCUAL, R.F.; FLORES, M.H.M.; FERNÁNDEZ, R.D.; ESPARZA, G.S.: “Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río Yaqui, Sonora, México”, *Agrociencia*, 49(2): 221-232, 2015, ISSN: 1405-3195.
- ESPINOSA, E.J.L.; PALACIOS, V.E.; TIJERINA, C.L.; FLORES, M.H.; QUEVEDO, N.A.: “Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1): 95-104, 2017, ISSN: 2007-2422.
- GLENN, P.E.; NEALE, M.C.; HUNSAKER, J.D.; NAGLER, L.P.: “Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems”, *Hydrological Processes*, 25(26): 4050-4062, 2011, ISSN: 0885-6087.
- HEILMAN, J.L.; HEILMAN, W.E.; MOORE, G.D.: “Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral Reflectance 1”, *Agronomy Journal*, 74(6): 967-971, 1982, ISSN: 0002-1962.
- HERRERA, P.J.; LÓPEZ, S.T.; GONZÁLEZ, R.F.: “El uso del agua en la agricultura en Cuba”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 1(2): 1-7, 2011, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- HUNSAKER, D.; BARNES, E.; CLARKE, T.; FITZGERALD, G.; PINTER JR, P.J.: “Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients”, *Transactions of the ASAE*, 48(4): 1395-1407, 2005a, ISSN: 2151-0032, e-ISSN: 2151-0040.
- HUNSAKER, J.D.; PINTER, J.P.; KIMBALL, A.B.: “Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index”, *Irrigation Science*, 24(1): 1-14, 2005b, ISSN: 0342-7188.
- MULLEADY, C.; BARRERA, D.F.: “Estimación de la tasa de evapotranspiración a partir de datos satelitales MODIS”, 2013, ISSN: 0325-187X. NASA: *NASA POWER Release 8 (with GIS Applications) M (Data Parameters, Sources, & Validate Documentation Date May 1, 2018 (Data Version 8.0.1), [en línea]*, Inst. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 2018, Disponible en: <http://earth-www.larc.nasa.gov/~power/documents/SSE>.
- NEALE, M.C.; BAUSCH, C.W.; HEERMANN, F.D.: “Development of reflectance-based crop coefficients for corn”, *Transactions of the ASAE*, 32(6): 1891-1900, 1990, ISSN: 2151-0032, e-ISSN: 2151-0040.
- RAHIMI, S.; GHOLAMI, S.M.A.; RAEINI, S.M.; VALIPOUR, M.: “Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment)”, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(5): 695-709, 2015, ISSN: 0365-0340.
- ROQUE, R.: *Respuesta de la papa (Solanum tuberosum L.) al riego en suelos Ferralíticos Rojos del occidente de Cuba*, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana (ISCAH), Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas ...), La Habana, Cuba, 1995.

Alberto Méndez-Jocik, Investigador, Empresa de Proyectos e Ingeniería del Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba, e-mail: [mendez@enpa.minag.cu](mailto:mendez@enpa.minag.cu)  
Anett De Jesús Núñez- Pérez, Ingeniera, graduada en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”-CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba, e-mail: [felicita.gonzalez@boyeros.iagric.cu](mailto:felicita.gonzalez@boyeros.iagric.cu)

Felicita González-Robaina, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba. e-mail: [felicitagonzalez89@gmail.com](mailto:felicitagonzalez89@gmail.com)

The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

This article is subject to the Creative Commons 4.0 International Attribution-Non-Commercial License (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.