



# Ajuste del coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección

## Bean (*Phaseolus vulgaris*) basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) adjusted by remote sensing

Jheison A. Guerrero-Gutierrez<sup>1</sup> ; Enrique A. Torres<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia; e-mail: [jhaguerrero@unal.edu.co](mailto:jhaguerrero@unal.edu.co), [eatoresp@unal.edu.co](mailto:eatoresp@unal.edu.co)

\*autor de correspondencia: [eatoresp@unal.edu.co](mailto:eatoresp@unal.edu.co)

**Cómo citar:** Guerrero-Gutierrez, J.A.; Torres, E.A. 2022. Ajuste del coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e1832. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1832>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** febrero 21 de 2021

**Aceptado:** noviembre 16 de 2022

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

Para realizar un manejo eficiente del agua en la agricultura es necesario conocer los requerimientos hídricos del cultivo, lo cual, se puede realizar de manera sencilla y rápida, con la ayuda de cámaras convencionales. En este estudio, se determinaron los requerimientos hídricos de un cultivo de frijol (variedad DIACOL CALIMA G4494), sembrado en CIAT, Palmira - Valle del Cauca, Colombia, mediante la estimación de la curva del coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ), derivada de la curva de fracción de cobertura vegetal ( $F_{cv}$ ). Para determinar la curva de fracción de cobertura vegetal, se emplearon imágenes tomadas con una cámara digital en el espectro visible (RGB), a baja altura (menos de 3 m). Las necesidades hídricas del cultivo de frijol, se calcularon empleando los valores del coeficiente basal de cultivo derivados junto con la modelación FAO-56. Los resultados indican que la curva de  $K_{cb}$  ajustada por fotografía fue diferente a la curva estándar presentada en la publicación FAO-56 para frijol, mostrando, principalmente, diferencia en la duración de las etapas y los valores de  $K_{cb}$ , en estas etapas. En cuanto a las necesidades hídricas, al emplear la curva de  $K_{cb}$  ajustada por fotografías, se evidencia que el cultivo requiere más agua en las etapas media y final, para evitar estrés hídrico en las plantas.

Palabras clave: Evapotranspiración; FAO-56; Fracción de cobertura vegetal; Requerimientos hídricos de los cultivos; Sensores remotos.

### ABSTRACT

To carry out efficient water management in agriculture, it is necessary to know the water requirements of the crop, which can be done easily and quickly with the help of conventional cameras. In this study, the water requirements of a bean crop (DIACOL CALIMA G4494 variety) planted in CIAT, Palmira - Valle del Cauca, Colombia, were determined by estimating the curve of the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) derived from the vegetation cover fraction curve ( $F_{cv}$ ). To determine the vegetation cover fraction curve, images taken with a digital camera in the visible spectrum (RGB) at low height (less than 3m) were used. The water needs of the bean crop were calculated using the basal crop coefficient values derived together with the FAO-56 modelling. The results indicate that the  $K_{cb}$  curve adjusted by photography was different from the standard curve presented in the publication FAO-56 for beans, mainly showing a difference in the duration of the stages and the  $K_{cb}$  values in these stages. Regarding water needs, when using the  $K_{cb}$  curve adjusted by photographs, it is evident that the crop requires more water in the middle and final stages, to avoid water stress in the plants.

Keywords: Evapotranspiration; FAO-56; Plant cover fraction; Water requirements of crops; Remote sensing.

## INTRODUCCIÓN

El requerimiento hídrico, se define como la cantidad de agua que necesita ser suministrada al cultivo para compensar las pérdidas por evapotranspiración (ET) (Allen *et al.* 2006); sin embargo, este requerimiento es diferente durante cada fase de desarrollo de la planta, principalmente, por la estructura aérea de la planta o dosel, el tipo de raíces y las condiciones atmosféricas de la zona, de esta forma, la interacción entre la planta, el suelo y la atmósfera, determina la ET (Drerup *et al.* 2017). Es por esto que, cuantificar las necesidades hídricas del cultivo por medio de la estimación de la ET es fundamental para aplicar el agua, necesaria al cultivo y hacer un uso eficiente del recurso hídrico (Alam *et al.* 2018; Anderson & French, 2019).

La evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), se puede determinar utilizando la metodología que ha sido estandarizada por la FAO-56 y descrita por Allen *et al.* (2006), que emplea la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Esta metodología ha demostrado que proporciona precisión y confiabilidad de, aproximadamente, el 95 %, en las estimaciones diarias de  $ET_c$  y en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos (Allen & Pereira, 2009); además, se considera dentro del enfoque FAO-56, que los valores de  $ET_c$  son precisos, cuando se cuenta con los datos de las condiciones físicas del suelo y los reportes del seguimiento agronómico del cultivo (Olivera-Guerra *et al.* 2018).

Por otra parte, Bispo *et al.* (2022) y Pereira *et al.* (2015) definen el  $K_c$  como una relación entre la  $ET_c$  y  $ET_o$  y este coeficiente lo describen como un indicador de la demanda hídrica del cultivo y se deriva de las características físicas de la vegetación y de las condiciones climáticas de la zona (Ko *et al.* 2009); asimismo, el coeficiente se puede hallar con un enfoque único ( $K_c$ ), que tiene en cuenta las pérdidas por evaporación del suelo y transpiración de la planta o también como un enfoque doble, donde se divide el  $K_c$  en el coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ) y el coeficiente de evaporación ( $K_e$ ); el  $K_{cb}$ , se observa cuando la superficie evaporable del suelo es cero, lo cual, indica que representa solo la variación de la transpiración de la planta (Abrisqueta *et al.* 2013); sin embargo, Fenner *et al.* (2016) afirman que  $K_c$  y  $K_{cb}$  tienen un comportamiento muy similar durante las fases de desarrollo del cultivo (inicial, media y final); por otro lado,  $K_{cb}$  varía por la altura de la planta, la fracción cubierta del suelo, el número de hojas, el funcionamiento de los estomas, la radiación de la superficie y la humedad en la zona radicular (Jamshidi *et al.* 2020; López-Urrea *et al.* 2009a).

En estudios, como el de Pôças *et al.* (2020), se presentan resultados significativos, que demuestra la estimación del  $K_{cb}$  y la programación de riego, basados en técnicas de teledetección (TT); estas TT, para el estudio de la vegetación, se basan en la respuesta espectral de las hojas, cuyas características varían por la morfología y la fisiología de cada especie (Calera *et al.* 2017; De la Casa *et al.* 2018). De acuerdo con Odi-Lara *et al.* (2013), existe una fuerte relación entre las características biofísicas del cultivo (área foliar, biomasa, altura y  $K_{cb}$ ) con la respuesta espectral de la vegetación. Por otro lado, aplicar las TT para el monitoreo de la vegetación resulta ser un método eficiente

en la toma de datos temporales, de tal forma, que las metodologías basadas en teledetección permiten estimar las necesidades hídricas de la planta, mediante el uso de índices de vegetación (IV), que se relacionan ampliamente con el coeficiente de cultivo (Campos *et al.* 2017; Er-Raki *et al.* 2010). Por otra parte, estudios han demostrado que las relaciones  $K_{cb}$ -IV apoyadas con un balance de agua en el suelo establecen una combinación operativa para realizar modelos de programación de riego en diferentes tipos de cultivos, a escala regional y de campo (Garrido-Rubio *et al.* 2020; Pôças *et al.* 2015; Reyes-González *et al.* 2018; Toureiro *et al.* 2017). Esta relación  $K_{cb}$ -IV, usando sensores remotos, el seguimiento de variables meteorológicas y la metodología FAO-56, han establecido estimaciones precisas de la  $ET_c$  y los requerimientos hídricos del cultivo (Campos *et al.* 2017; Odi-Lara *et al.* 2016; Ortiz & Torres, 2018).

Otro enfoque de uso común es obtener los valores  $K_{cb}$  mediante el seguimiento de la fracción de cobertura vegetal (Fcv), con fotografía en el visible (Chianucci, 2016; Song *et al.* 2015); por consiguiente, algunas investigaciones han demostrado resultados confiables con el enfoque  $K_{cb}$ -Fcv; por ejemplo, se tienen las aproximaciones de López-Urrea *et al.* (2009b; 2012; 2016) y Trout & DeJonge (2018), en diversos cultivos; por tanto, la relación  $K_{cb}$ -Fcv puede ser usada para estimar las necesidades hídricas, en gran variedad de cultivos (Chianucci *et al.* 2018).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue estimar la curva de coeficiente basal del cultivo ( $K_{cb}$ ) de frijol (*Phaseolus vulgaris*), variedad "Diacol Calima" G4494, a partir de la fracción de cobertura vegetal (Fcv), utilizando imágenes fotográficas a baja altura. Este trabajo, se presenta como una metodología sencilla que adapta los valores de  $K_{cb}$  de FAO-56 a condiciones de campo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio, se realizó en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en Palmira - Valle del Cauca, Colombia, N3°32'21,98" O 76°18' 12,99", 969 m s.n.m., entre septiembre y diciembre de 2019, temporada de altas precipitaciones.

Para este trabajo, se sembró un cultivo de frijol variedad "Diacol Calima"; el período de estudio tuvo una duración de 94 días y comprendió desde el 26 de septiembre hasta el 27 de diciembre de 2019. Para el estudio, se consideraron las diferentes etapas fenológicas del cultivo, presentadas en la tabla 1. Para el experimento, se utilizó una parcela de 236 m<sup>2</sup>, donde se establecieron 5 surcos de siembra de 52,4 m de longitud y 0,5 m de ancho; la separación entre surcos fue de 0.9 m; la separación entre plantas fueron 10 cm, con lo que se obtuvo una densidad de plantas de 111.000 plantas ha<sup>-1</sup>; para minimizar las pérdidas por evaporación, se utilizó acolchado plástico color plata/negro.

Por otra parte, el suelo para la siembra fue preparado con una mezcla de materia orgánica en proceso de humificación (humus de lombriz), arena y turba de coco, metodología usada por el Programa de Recursos Genéticos (PRG), del CIAT. El suelo resultante corresponde a una textura arcillosa, con valores de humedad

Tabla 1. Fenología del cultivo de frijol.

Fenología	Etapa	Fecha	DDS	Día Juliano
Siembra		26/09/2019	0	269
Emergencia	V1	01/10/2019	5	274
1 hojas Trifoliadas		12/10/2019	18	285
3 hojas Trifoliadas	V4	18/10/2019	24	291
Prefloración	R5	25/10/2019	31	298
Floración	R6	31/10/2019	37	304
Formación de vainas	R7	11/11/2019	48	315
Maduración	R9	29/11/2019	66	333
Cosecha		27/12/2019	94	361

a capacidad de campo (CC), de 35,5 % y punto de marchitez permanente (PMP), de 22,6 %.

El manejo nutricional lo realizó el PRG del CIAT, mediante fertirrigación semanal, con Hidranova, Calcimit y elementos menores, con una concentración promedio de  $2 \text{ g l}^{-1}$ , durante todo el desarrollo del cultivo, hasta los 81 DDS.

Se instaló un sistema de riego por goteo, que compensó la demanda hídrica del cultivo con goteros de  $11 \text{ h}^{-1}$ , distanciados a 20 cm entre goteros y con un bulbo de humedecimiento de 20 cm de ancho, aproximadamente; las aplicaciones fueron realizadas de acuerdo con la programación establecida por el PRG del CIAT, para todo el ciclo del cultivo.

Para estimar la necesidad hídrica del cultivo, se utilizó la metodología FAO-56, propuesta por Allen *et al.* (2006). La  $ET_c$ , se calculó con la ecuación 1.

$$ET_c = ET_o \times (K_{cb} + K_c) \quad \text{ecuación 1}$$

Donde,  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo (mm),  $ET_o$  la evapotranspiración de referencia (mm),  $K_{cb}$  es el coeficiente basal de cultivo (transpiración) y  $K_c$  el coeficiente de evaporación de suelo.

Para la estimación de la  $ET_o$ , se trabajó con una estación meteorológica de marca DAVIS, instalada sobre una superficie de referencia (pasto), que mide las variables de humedad relativa, velocidad de viento, temperatura del aire y radiación solar, las cuales, se integran en la ecuación de Penman-Monteith, que es proporcionada por la FAO-56, como una de las metodologías más utilizadas para la estimación de la  $ET_o$  (Pereira *et al.* 2015).

La unidad experimental de este estudio fue la parcela de frijol (Diacol Calima), de  $236 \text{ m}^2$ . A esta parcela, se le realizó un seguimiento fotográfico (detallado más adelante), para el cual, se definieron cinco puntos al azar, distribuidos a lo largo de la parcela, como se observa en la figura 1. Los puntos de seguimiento, se marcaron con estacas y se mantuvieron fijos, durante el tiempo del cultivo.

El seguimiento, se realizó mediante una campaña fotográfica semanal (13 campañas en total), con una cámara digital Pentax,

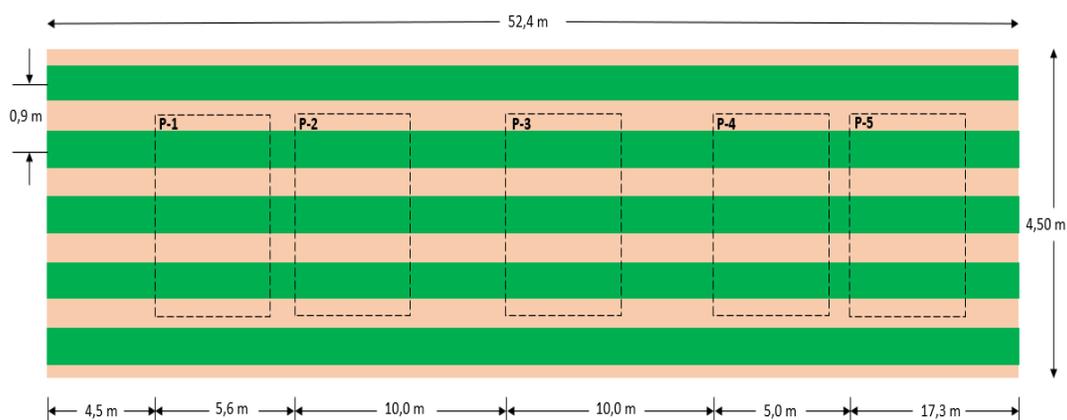


Figura 1. Distribución de las parcelas en el campo, líneas de surco (color verde), a 90 cm; los cuadros (líneas discontinuas) indican el área de cada parcela (unidad experimental) cubierta por la fotografía, respectivamente.

modelo Optio E85, de 12 megapíxeles, con un sensor CCD de 6,17 por 4,55 mm (sensible a las longitudes de onda del azul, verde y rojo) y un campo de visión de  $53,13^\circ$  (con una distancia focal de 32 mm). En cada uno de los cinco puntos de seguimiento, se tomaron

tres repeticiones fotográficas; para la toma de las fotografías, la cámara se instaló en una pértiga de aluminio en forma de "T", a una altura de 2,86 m del suelo y a una distancia horizontal (brazo), de 1,50 m. Esta altura de la cámara (en la pértiga), se estableció

para seguir los tres surcos centrales de la parcela, dejando un surco a cada lado sin fotografiar, para reducir el efecto de borde en el muestreo. El área de muestreo en cada fotografía fue de 7,71 m<sup>2</sup> (3,20m x 2,41m), aproximadamente. En cada campaña, la pértiga se instalaba en cada uno de los cinco puntos de muestreo definidos, se nivelaba y se tomaban tres fotografías verticales por punto, para un total de 15 fotografías por campaña. La toma de las fotografías, se realizó siempre en horas de la mañana, entre las 10 a. m. y las 12 del mediodía.

Con la herramienta ArcGIS 10.4.1, se realizó el tratamiento de las fotografías, mediante un proceso de clasificación supervisada; esta

herramienta permite diferenciar entre los píxeles de plástico, suelo y planta, obteniendo los porcentajes de Fcv, como se muestra en la figura 2. De esta forma, en cada campaña, se obtuvieron 15 datos de Fcv, con los cuales, se determinó el promedio y la desviación estándar, para cada fecha de la campaña de muestreo.

El tratamiento de los datos, se realizó semanalmente para cada campaña hasta la cosecha del cultivo (94 DDS). Luego, para la estimación del K<sub>cb</sub> del frijol, se utilizaron varios modelos K<sub>cb</sub>-Fcv, reportados en la literatura (Tabla 2). Para este trabajo, se utilizaron ocho aproximaciones matemáticas K<sub>cb</sub>-Fcv, para realizar la curva de K<sub>cb</sub>-Ajustado y determinar la duración de las etapas. Los valores de

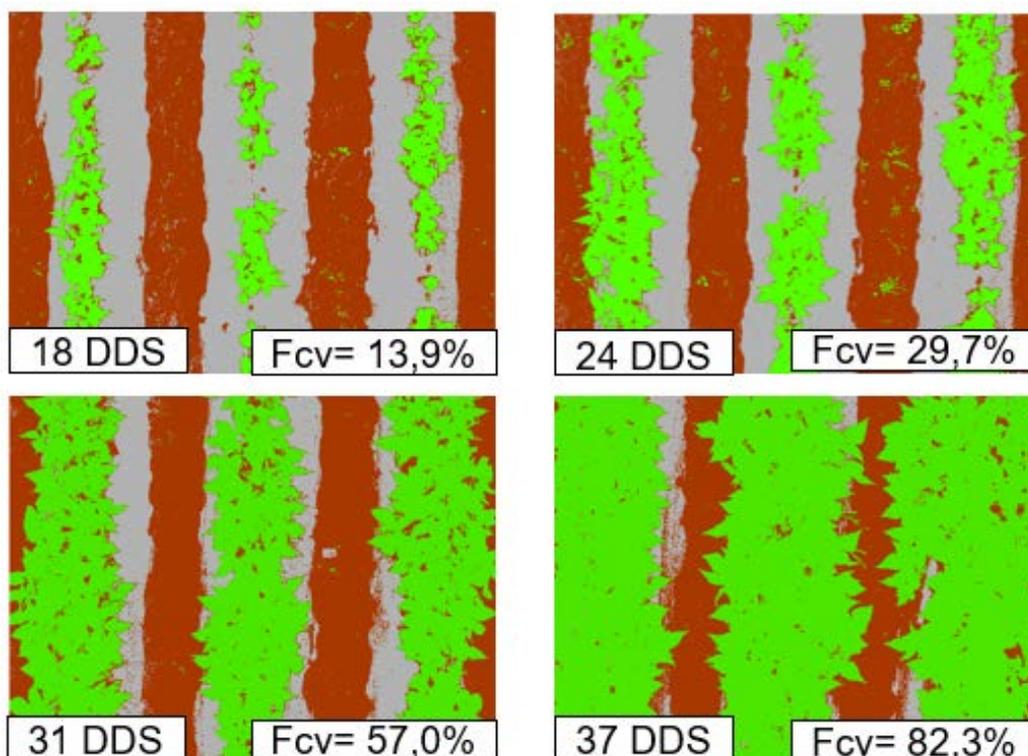


Figura 2. Clasificación supervisada realizada en las primeras 4 campañas de campo en el cultivo de frijol; color marrón, como suelo; color gris, como plástico y color verde, como vegetación.

Tabla 2. Modelos empleados de la relación entre la Fcv y el coeficiente basal de cultivo (K<sub>cb</sub>) reportados en la literatura, para la estimación de la curva de K<sub>cb</sub> en el cultivo de frijol.

Ecuación K <sub>cb</sub>	R <sup>2</sup>	Cultivo	Autor
$K_{cb} = 1,13F_{cv} + 0,14$	***	Maíz	Johnson & Trout (2012)
$K_{cb} = 1,10F_{cv} + 0,17$	0,91	Maíz_Fase Completa	Trout & DeJonge (2018)
$K_{cb} = 1,08F_{cv} + 0,17$	0,93	Maíz_Fase V	
$K_{cb} = 1,21F_{cv} + 0,10$	0,77	Maíz_Fase R	
$K_{cb} = -0,985F_{cv}^2 + 1,759F_{cv} + 0,272$	0,99	Ajo	Johnson & Trout (2012)
$K_{cb} = -0,078F_{cv}^2 + 1,124F_{cv} + 0,142$	0,99	Pimentón	
$K_{cb} = -0,933F_{cv}^2 + 1,756F_{cv} + 0,181$	0,99	Brócoli	
$K_{cb} = -0,07F_{cv}^2 + 1,08F_{cv} + 0,209$	0,99	Lechuga	

$K_{cb}$ -Ajustado presentados son el resultado del promedio de todas las aproximaciones matemáticas  $K_{cb}$ -Fcv empleadas.

Por último, se realizaron dos modelaciones basadas en la metodología FAO-56, con el fin de observar los efectos del  $K_{cb}$  estimado en el cálculo del requerimiento hídrico del cultivo. En primer lugar, la modelación FAO-56, que adopta la programación de riego y los valores de  $K_{cb}$  del cultivo de frijol descritos por la FAO-56. En segundo lugar, la modelación FAO-56- $K_{cb}$ -Ajustado, la cual, se basa en la programación de riego por FAO-56 con el  $K_{cb}$ -Ajustado, presentado en la figura 3c.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Usando los datos meteorológicos de la estación DAVIS, se calculó la  $ET_o$ , (Allen *et al.* 2006), para el periodo del cultivo, como se muestra en la figura 3a. En esta figura, se observa una  $ET_o$  promedio de 3,8 mm, un valor máximo de 5,3 mm, a los 2 DDS y un valor mínimo de 2,5 mm, a los 80 DDS; por otro lado, se observa el comportamiento de la precipitación que muestra un ciclo lluvioso, con una lámina total de 256,8 mm, una precipitación máxima diaria de 82,5 mm, a los 6 DDS y una mínima de 0,5 mm, a los 45 DDS.

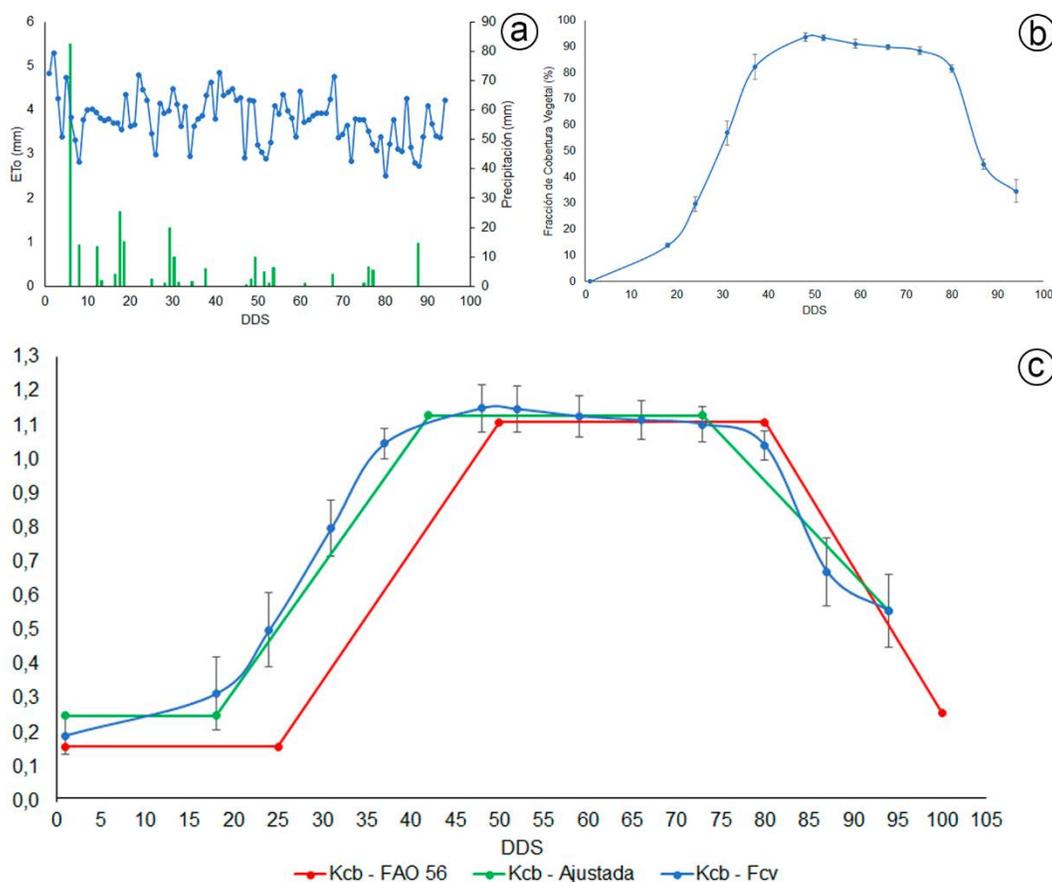


Figura 3. a) Comportamiento de la  $ET_o$  (línea azul) y precipitación (barras verdes). La línea roja horizontal muestra el promedio de  $ET_o$ . b) Evolución de la fracción de cobertura vegetal del cultivo de frijol DIACOL CALIMA G4494. Las líneas negras verticales indican la desviación estándar. c) Valores de  $K_{cb}$  del cultivo de frijol, la curva de  $K_{cb}$ -Fcv estimada con los modelos reportados en la tabla 2 (color azul), la curva de  $K_{cb}$ -FAO-56 (color rojo) y la curva  $K_{cb}$ -Ajustada (color verde).

Por otra parte, en la figura 3b, se muestran los resultados de la evolución de la fracción de cobertura vegetal, obtenida por TT, basadas en el seguimiento fotográfico al cultivo.

Los resultados muestran una Fcv máxima de 93,8 % (42 DDS), correspondiente a la formación de vainas y una Fcv final, 34,6 % (94 DDS). La desviación estándar osciló entre 0,8 y 4,8, presentándose las desviaciones más altas entre las etapas de prefloración y floración (31-37 DDS), así como en cosecha (87-94 DDS), por los cambios

de senescencia de las plantas en la última semana.

En la figura 3c, empleando los resultados de Fcv presentados en la figura 3b y los modelos  $K_{cb}$ -Fcv, presentados en la tabla 2, se estimó la evolución real del  $K_{cb}$  del cultivo ( $K_{cb}$ -Fcv, línea azul). En esta figura, también se muestra la curva de  $K_{cb}$ , que presenta la publicación FAO-56 ( $K_{cb}$ -FAO-56, línea roja) y la curva ajustada de  $K_{cb}$  ( $K_{cb}$ -Ajustada, línea verde), deducida de la curva  $K_{cb}$ -Fcv.

Al comparar la curva  $K_{cb}$ -FAO-56 (Allen *et al.* 2006) con la curva  $K_{cb}$ -Fcv, en la figura 3c, se observó que presentan el mismo patrón de desarrollo vegetativo, pero diferente en la etapa inicial, desarrollo y final, aunque coinciden parcialmente en la etapa media. Esto mostró, la necesidad de trazar una nueva curva de  $K_{cb}$ , la cual, se denominó  $K_{cb}$ -Ajustada. Esta curva  $K_{cb}$ -Ajustada presentó un valor

de  $K_{cb}$  de 0,24, en la etapa inicial, de 1,12, correspondiente a la etapa media y de 0,55, en la etapa final o de senescencia, diferentes a los presentados por la curva  $K_{cb}$ -FAO-56 (0,15, etapa inicial; 1,10, etapa media y de 0,25, etapa final). Los valores de  $K_{cb}$  duración de las etapas de la aproximación FAO-56 y la aproximación presentada en este estudio, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los valores de  $K_{cb}$ -Ajustados, duración de las etapas de crecimiento y modelaciones empleadas en la hoja de cálculo de FAO-56, en el cultivo de frijol, comparados con los valores de FAO-56.

Modelación	Etapas del cultivo	Duración (días)	Valores de $K_{cb}$	ET <sub>o</sub> (mm)	ET <sub>c</sub> (mm)	Riego (mm)
FAO-56	Inicial	25	0,15	99	61	56
	Desarrollo	25	0,15 - 1,10	99	98	81
	Media	30	1,10	110	131	152
	Final	20	0,25	71	58	23
	<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>379</b>	<b>347</b>	<b>312</b>
FAO-56- $K_{cb}$ -Ajustado	Inicial	18	0,24	71	48	46
	Desarrollo	24	0,24 - 1,12	96	97	94
	Media	31	1,12	118	144	149
	Final	21	0,55	72	64	24
	<b>Total</b>	<b>94</b>		<b>357</b>	<b>353</b>	<b>313</b>

Por otra parte, referente a la duración de las etapas de crecimiento mostradas en la tabla 3, los resultados indican que, con respecto a las duraciones presentadas en FAO-56, el cultivo presenta una etapa inicial más corta, con una diferencia de 7 días, mientras que las etapas de desarrollo y medias fueron prácticamente iguales (etapa de desarrollo, un día menor y etapa media y final, un día más). Por lo anterior, se observa que el cultivo de frijol sembrado bajo estas condiciones de campo es más precoz (6 días menos), que el presentado por FAO-56.

Para entender el efecto de la curva de  $K_{cb}$  ajustada en las necesidades hídricas del cultivo, se realizaron las simulaciones FAO-56, con las dos curvas de  $K_{cb}$ . En estas simulaciones, para observar mejor las diferencias en necesidades hídricas (ET<sub>c</sub>) de los dos escenarios y el riego aplicado, se eliminó la precipitación registrada durante la etapa de cultivo. Los resultados de las simulaciones, se presentan por etapa en la tabla 3. En términos generales, la ET<sub>c</sub> total es muy similar en las dos simulaciones (solo difieren en un 2 %), a pesar de los 6 días de diferencia, en la duración total del cultivo. Las diferencias principales en ET<sub>c</sub>, se presentan en la etapa media y final, donde, como consecuencia del  $K_{cb}$  (ajustado) más alto, la ET<sub>c</sub> es mayor en la modelación FAO-56- $K_{cb}$ -Ajustado, lo que indica, que no usar el  $K_{cb}$ -Ajustado, podría conducir a aplicar láminas de riego inferiores a las necesarias durante el llenado del grano, lo que podría generar la reducción de la producción. También, con el  $K_{cb}$ -Ajustado, se puede evitar el exceso de riego en la etapa inicial.

De la presente investigación, se concluye que el uso de la fotografía a baja altura permitió estimar la curva de  $K_{cb}$ -Ajustado para frijol, mediante Fcv y su consiguiente cuantificación de las necesidades hídricas del cultivo, para las condiciones del estudio en el Valle del Cauca. Esta curva de  $K_{cb}$  ajustada mostró diferencias con la curva publicada por FAO-56, en valores de  $K_{cb}$  y duraciones. A pesar de que la duración del cultivo de frijol en las condiciones del estudio, se redujo en 6 días, las necesidades hídricas se mantienen estables, debido a que los valores de  $K_{cb}$ , en las etapas media y final, son más altos, generando mayor consumo de agua del cultivo en estas etapas; sin embargo, esta curva de  $K_{cb}$ , estimada desde Fcv, permite aplicar, de forma precisa, el agua requerida por el cultivo, evitando el estrés del cultivo por bajas aplicaciones o la sobre irrigación en las etapas iniciales, por considerar  $K_{cb}$  más bajos de los reales.

Finalmente, la relación  $K_{cb}$ -Fcv se presenta como una alternativa sencilla, que permite a los agricultores estimar con precisión los requerimientos hídricos del cultivo y así, realizar un manejo eficiente del recurso hídrico.

**Agradecimientos.** En agradecimiento por la colaboración para la realización del presente estudio por medio del proyecto financiado “Manejo y uso eficiente del agua en la agricultura del Valle del Cauca como medida adaptación al cambio climático” con código 5060 – 202010013210 de la Universidad Nacional de Colombia; también al equipo y personal del Programa de Recursos Genéticos

(PRG) del CIAT por brindar las instalaciones para la realización de este estudio y por su gran apoyo y colaboración; también, agradecer al equipo de trabajo profesores y compañeros por su apoyo y dedicación en el proyecto de investigación.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## REFERENCIAS

1. ABRISQUETA, I.; ABRISQUETA, J.M.; TAPIA, L.M.; MUNGUÍA, J.P.; CONEJERO, W.; VERA, J.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C. 2013. Basal crop coefficients for early-season peach trees. *Agricultural Water Management*. 121:158-163. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.001>
2. ALAM, M.S.; LAMB, D.W.; RAHMAN, M.M. 2018. A refined method for rapidly determining the relationship between canopy NDVI and the pasture evapotranspiration coefficient. *Computers and Electronics in Agriculture*. 147:12-17. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.008>
3. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*. 28(1):17-34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>
4. 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. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Roma). 298p.
5. ANDERSON, R.G.; FRENCH, A.N. 2019. Crop evapotranspiration. *Agronomy*. 9(10):614. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100614>
6. BISPO, R.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; GONÇALVES, I.Z.; NEALE, C.M.U.; TEIXEIRA, A.H.C. 2022. Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. *Agricultural Water Management*. 271:107763. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107763>
7. CALERA, A.; CAMPOS, I.; OSANN, A.; D'URSO, G.; MENENTI, M. 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. *Sensors (Switzerland)*. 17(5):1104. <https://doi.org/10.3390/s17051104>
8. CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; SUYKER, A.E.; ARKEBAUER, T.J.; GONÇALVES, I.Z. 2017. Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. *Agricultural Water Management*. 187:140-153. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.022>
9. CHIANUCCI, F. 2016. A note on estimating canopy cover from digital cover and hemispherical photography. *Silva Fennica*. 50(1):1-10. <https://doi.org/10.14214/sf.1518>
10. CHIANUCCI, F.; LUCIBELLI, A.; DELL'ABATE, M.T. 2018. Estimation of ground canopy cover in agricultural crops using downward-looking photography. *Biosystems Engineering*. 169:209-216. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.012>
11. DE LA CASA, A.; OVANDO, G.; BRESSANINI, L.; MARTÍNEZ, J.; DÍAZ, G.; MIRANDA, C. 2018. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 146:531-547. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>
12. DRERUP, P.; BRUECK, H.; SCHERER, H.W. 2017. Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe. *Agricultural Water Management*. 192:180-188. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.010>
13. ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; DUCHEMIN, B. 2010. Combining satellite remote sensing data with the FAO-56 dual approach for water use mapping in irrigated wheat fields of a semi-arid region. *Remote Sensing*. 2(1):375-387. <https://doi.org/10.3390/rs2010375>
14. FENNER, W.; DALLACORT, R.; DE FREITAS, P.S.L.; FARIA JÚNIOR, C.A.; DE CARVALHO, M.A.C.; BARIVIERA, G. 2016. Dual crop coefficient of common bean in Tangará da Serra, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 20(5):455-460. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p455-460>
15. GARRIDO-RUBIO, J.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; CAMPOS, I.; OSANN, A.; GONZÁLEZ-GÓMEZ, L.; CALERA, A. 2020. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agricultural Water Management*. 238:106236. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236>
16. JAMSHIDI, S.; ZAND-PARSA, S.; KAMGAR-HAGHIGHI, A.A.; SHAHSAVAR, A.R.; NIYOGI, D. 2020. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semiarid climatic conditions. *Agricultural Water Management*. 227:105838. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>

17. JOHNSON, L.F.; TROUT, T.J. 2012. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*. 4(2):439-455. <https://doi.org/10.3390/rs4020439>
18. KO, J.; PICCINNI, G.; MAREK, T.; HOWELL, T. 2009. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (Kc) of cotton and wheat. *Agricultural Water Management*. 96(12):1691-1697. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.023>
19. LÓPEZ-URREA, R.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; MONTORO, A.; LÓPEZ-FUSTER, P. 2009a. 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>
20. LÓPEZ-URREA, R.; MARTÍNEZ-MOLINA, L.; DE LA CRUZ, F.; MONTORO, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; ODI-LARA, M.; SÁNCHEZ, J.M. 2016. Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated biomass sorghum for energy production. *Irrigation Science*. 34(4):287-296. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0503-y>
21. LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. 2009b. Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*. 96(9):1305-1310. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.015>
22. LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; MAÑAS, F.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. 2012. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature "Tempranillo" wine grapes. *Agricultural Water Management*. 112:13-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.009>
23. ODI-LARA, M.; CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; ORTEGA-FARÍAS, S.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; BALBONTÍN, C.; CALERA, A. 2016. Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sensing*. 8(3):253. <https://doi.org/10.3390/rs8030253>
24. 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.
25. OLIVERA-GUERRA, L.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S.; KHABBA, S.; ESCORIHUELA, M.J. 2018. Estimating the water budget components of irrigated crops: Combining the FAO-56 dual crop coefficient with surface temperature and vegetation index data. *Agricultural Water Management*. 208:120-131. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.014>
26. ORTIZ, E.; TORRES, E.A. 2018. Assessing water demand with remote sensing for two coriander varieties. *Agronomía Colombiana*. 36(3):274-283. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n3.71809>
27. PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*. 147:4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
28. PÔÇAS, I.; CALERA, A.; CAMPOS, I.; CUNHA, M. 2020. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agricultural Water Management*. 233:106081. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>
29. PÔÇAS, I.; PAÇO, T.A.; PAREDES, P.; CUNHA, M.; PEREIRA, L.S. 2015. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*. 7(3):2373-2400. <https://doi.org/10.3390/rs70302373>
30. REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAME, L. 2018. Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. *Advances in Meteorology* 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>
31. SONG, W.; MU, X.; YAN, G.; HUANG, S. 2015. Extracting the green fractional vegetation cover from digital images using a shadow-resistant algorithm (SHAR-LABFVC). *Remote Sensing*. 7(8):10425-10443. <https://doi.org/10.3390/rs70810425>
32. TOUREIRO, C.; SERRALHEIRO, R.; SHAHIDIAN, S.; SOUSA, A. 2017. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agricultural Water Management*. 184:211-220. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>
33. TROUT, T.J.; DEJONGE, K.C. 2018. Crop water use and crop coefficients of maize in the great plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 144(6):1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001309)