

ARTÍCULO ORIGINAL

Estimación de las necesidades hídricas de la papaya utilizando la aproximación de los coeficientes culturales duales

Papaya estimation of water requirements using the dual crop coefficient

Yoima Chaterlán¹, Ricardo Rosa², Geisy Hernández³, Teresa López⁴ y Luis S. Pereira²

RESUMEN. Considerando el incremento de la actividad de riego en el cultivo de la papaya durante los últimos años, resulta de interés el conocimiento de los elementos técnicos y agronomicos necesarios para una adecuada programación del riego a partir de la estimación de las necesidades hídricas del cultivo. Para esto se utilizó el modelo SIMDualKc el cual efectúa el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la programación del riego a partir de la metodología de los coeficientes culturales duales ($K_c = K_{cb} + K_e$). La investigación fue realizada en la Estación Experimental de Riego y Drenaje, situada en Alquizar, provincia La Habana, Cuba. Los experimentos fueron desarrollados entre el período marzo-noviembre 1997. Se utilizó la Papaya var. "Maradol roja". La calibración consistió en la búsqueda de los coeficientes culturales basales para las diferentes etapas de desarrollo del cultivo reduciendo al mínimo las diferencias entre los valores simulados y observados del contenido de humedad del suelo. Fue evaluada la bondad de ajuste de las predicciones del modelo, realizándose una serie de análisis estadísticos. Se puede concluir que el modelo puede ser utilizado para la generación de calendarios alternativos de riego destinados a mejorar el ahorro de agua y la productividad de la papaya en estas condiciones edafoclimáticas.

Palabras clave: evaporación, transpiración, balance de agua en el suelo, modelación.

ABSTRACT. Considering the increased activity of irrigation in the cultivation of papaya in recent years, interest is knowledge of the technical and agronomic necessary for proper irrigation scheduling based on the estimation of crop water requirements. For this we used the model SIMDualKc, which make the calculation of crop evapotranspiration (ET_c) and irrigation scheduling based on the methodology of the dual crop coefficient ($K_c = K_{cb} + K_e$). The research was conducted at the Experimental Station of Irrigation and Drainage, located in Alquizar, Havana, Cuba. The experiments were carried out between the periods march to november 1997. We used the Papaya (Carica papaya L.) var. "Maradol red." The calibration consisted in the search for cultural factors at baseline for the different stages of crop development by minimizing the differences between the simulated and observed soil moisture content. Was evaluated for goodness of fit of the model's predictions SIMDualKc, realizandocce a series of statistical analysis. It can be concluded that the model can be used to generate alternative schedules irrigation to improve water conservation and productivity of papaya in these soil and climatic conditions.

Keywords: evaporation, transpiration, soil water balance, modeling, crop evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

La Papaya, más conocida en Cuba como *Fruta Bomba* (Carica papaya L.), es una planta de origen tropical, específicamente de la región Centroamericana (Sur de México). Debido

a esto, está adaptada a los regímenes pluviométricos de esta región, y no tolera déficits hídricos prolongados, por lo que la irrigación en las áreas con baja pluviometría puede llegar a duplicar los rendimientos respecto a las áreas sin riego. Los factores ambientales como la temperatura (Campostrini y

Recibido 29/09/10, aprobado 19/05/12, trabajo 33/12, artículo original.

¹ MSc., Inv., Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Apdo. Postal 6090; La Habana, Cuba, E-✉: yoima@iagric.cu

² Dr. C., Prof., CEER-Biosystems Engineering, ISA, Technical Univ. of Lisbon, Portugal.

³ MSc., Inv Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Centro de mecanización Agropecuaria (CEMA), Mayabeque, Cuba.

⁴ Dr. C., Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), La Habana, Cuba.

Glenn, 2007), la velocidad del viento, el estrés hídrico (Marler y Clemente, 2006) y las características químicas y físicas de los suelos afectan su fisiología y su productividad (Campostrini y Glenn, 2007).

El déficit de agua en este cultivo limita el crecimiento de las plantas favoreciendo la producción de flores masculinas (Terra de Almeida *et al.*, 2003; dos Santos *et al.*, 2008) y la reducción de la producción de frutos (Aiyelaagbe *et al.*, 1986; Kruger y Mostert, 2007). A su vez, el exceso de riego afecta a la absorción de nutrientes, favorece su lixiviación, disminuye la disponibilidad de oxígeno en la zona radicular, y aumenta la propensión a las plagas y enfermedades (Campostrini y Yamanishi, 2001; Campostrini y Glenn, 2007). Por lo tanto, las buenas prácticas de gestión de riego en el cultivo de la papaya deben de estar referidas al manejo de escenarios con exceso y déficit de humedad del suelo.

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), utilizando la metodología de los factores culturales medios (K_c) ofrece resultados satisfactorios para los cálculos con diferentes espacios de tiempo, incluyendo la estimación de la evapotranspiración diaria para la mayoría de las aplicaciones (Pereira, 2004). Sin embargo, para el riego de alta frecuencia como es el caso del riego por goteo, y para cultivos con cobertura parcial del suelo como es el caso de los frutales y las hortalizas, así como las regiones con precipitaciones frecuentes, el uso de la metodología de los coeficientes de cultivo duales permite producir estimaciones más precisas de la evapotranspiración de la cultura (Allen *et al.*, 2005a). De hecho, dividir el coeficiente cultural (K_c) en los componentes de evaporación del suelo (K_e) y del coeficiente cultural basal (K_{cb}) permite una mejor percepción de las fracciones de agua, provenientes de la precipitación o del riego, utilizadas por el cultivo, así como evaluar las ventajas de mantener una fracción del suelo seca o la utilización de mulches para controlar la evaporación del suelo (E).

El modelo SIMDualKc (Rosa *et al.*, 2010), considera de forma separada la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, analizando el modo como el agua de la precipitación y el agua de riego son utilizadas por el cultivo. SIMDualKc efectúa el balance hídrico del suelo a nivel de la parcela, utilizando periodos de tiempo diario y ofreciendo diferentes aproximaciones para estimar la percolación profunda, la ascensión capilar y el escurrimiento superficial. El modelo permite simular la utilización de *mulches* y de coberturas vegetales activas. Resultados sobre la determinación de los coeficientes duales, la fracción de cobertura del suelo (f_c) y una serie de variables tales como el agua fácilmente evaporable (REW) y el agua total evaporable o lámina máxima de agua que puede ser evaporada en el suelo (TEW) para el cultivo de la papaya en las condiciones del área de estudio, que hasta la fecha no han sido considerados en este tipo de cultivos frutícolas y no están disponibles en la literatura; son estimadas a partir de la calibración del modelo para su posterior utilización en la gestión de alternativas de programación de riego en condiciones de escasez de agua.

El objetivo de este trabajo consiste en estimar las necesidades de agua del cultivo utilizando la metodología de los coeficientes culturales duales con el fin de mejorar la gestión del riego y generar calendarios alternativos de riego.

MÉTODOS

La investigación fue realizada en la Estación Experimental de Riego y Drenaje, situada en el municipio Alquízar, provincia La Habana (latitud 22° 46' N, longitud 82° 37' N y 6 m de altura). Los experimentos que la conforman fueron desarrollados durante el período comprendido entre Marzo y Noviembre 1997. La caracterización climática para este período (1997) se presenta en la Figura 1. La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue calculada utilizando el método de FAO-PM (Allen *et al.*, 1998). Este año se considera un año húmedo, con precipitaciones anuales de 2118 mm, que van desde 34 hasta 421 mm-mes⁻¹.

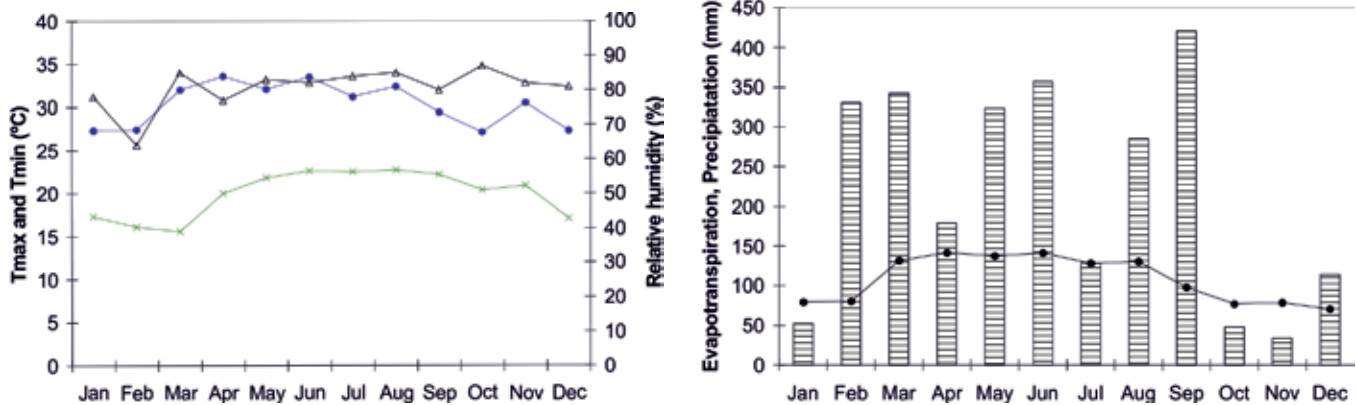


FIGURA 1. Caracterización climática: a) máxima (●) y mínima (×) temperatura y humedad relativa (—△—), b) precipitación mensual (▨) y referencia mensual de la evapotranspiración ET_0 (—●—).

El suelo donde se realizó la investigación está clasificado como Ferralítico rojo compactado, o Rhodic Ferralsols, según FAO/UNESCO, el cual se caracteriza por ser arcilloso, profundo y muy permeable. Las observaciones del potencial hídrico del suelo se realizaron con tensiómetros a 0,20, 0,40 y 0,60 m, con 3 repeticiones en cada profundidad (Hernández *et al.*, 2003). Los datos referentes al contenido de agua en el suelo se obtuvieron a través del modelo de Van Genuchten (López, 1996). Se utilizó la

Papaya (*Carica papaya* L) var. “Maradol roja”, la cual se caracteriza por ser un arbusto de porte mediano y tallo fuerte, con flores predominantes del tipo IV (Elongata), con frutos de tamaño mediano en un marco de 1,5 m entre plantas por 3,6 m entre hileras, lo que propició una densidad de 1851 plantas/ha. En este caso de estudio se utilizó el riego localizado de alta frecuencia (RLAF), debido a los altos niveles de humedad que permite mantener en el suelo y los ahorros de agua y energía que logra. En la Tabla 1 se muestra las fechas y los valores de las profundidades de riego aplicadas.

TABLA 1. Calendario de riego aplicado

Fecha	Cantidad del riego (mm)	Fecha	Cantidad del riego (mm)
09/05/1997	17,34	02/07/1997	20,20
26/05/1997	12,43	12/07/1997	20,60
31/05/1997	8,90	17/07/1997	6,12
06/06/1997	6,73	09/08/1997	13,66
21/06/1997	28,14	27/08/1997	10,20
27/06/1997	6,12	22/10/1997	6,10

El modelo SIMDualKc calcula la ET_c utilizando datos de suelo, clima, cultivo y sistema de riego. Los datos sobre clima incluyen la temperatura máxima y mínima, velocidad del viento media, precipitación, y ET_o o puede calcular la ET_o utilizando las temperaturas. Los datos sobre el cultivo incluyen la identificación de la duración de las fases del ciclo del cultivo, la evolución de la cobertura del suelo, del crecimiento de las raíces y la altura del cultivo durante el ciclo cultural, y la selección de los correspondientes K_{cb} tabulados; el ajustamiento de los K_{cb} tabulados para las condiciones climáticas específicas de la región de estudio; el cálculo diario de los valores de K_e ; y el cálculo diario de ET_c . Usando esta metodología el modelo ejecuta la simulación del balance hídrico del suelo, a partir de la cual se derivan propuestas para la programación del riego.

La metodología para su determinación utilizando la estimación de los coeficientes culturales duales (Allen *et al.*, 1998, 2005b) consiste en la adopción de la siguiente formulación:

$$ET_c = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (1)$$

Todas observaciones realizadas para la papaya se utilizaron para calibrar el modelo en las condiciones del área experimental y derivar los coeficientes duales del cultivo y las otras variables resultantes de interés.

Con el fin de evaluar la bondad de ajuste de las predicciones del modelo SIMDualKc, se realizaron una serie de análisis estadísticos que permite tener una buena percepción de las tendencias de ajuste en el modelo utilizando una regresión forzada al origen. Los indicadores utilizados fueron los siguientes: coeficiente de regresión (b), coeficiente de determinación (R^2), el error medio cuadrático ($RMSE$, mm), el error máximo absoluto (AAE , mm), el error medio relativo (ARE , %), la eficiencia de modelación (EF) y el índice de ajustamiento (d_{IA}). Los indicadores seleccionados se basan en las aplicaciones anteriormente realizadas (Cholpankulov *et al.*, 2008; Chaterlán *et al.*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calibración consistió en la búsqueda de los coeficientes culturales duales para las diferentes etapas de desarrollo del cultivo reduciendo al mínimo las diferencias entre los valores simulados y observados del contenido de humedad del suelo. En la Tabla 2 se muestran los valores calibrados y en la Figura 2 la variación del contenido de agua del suelo simulado por el modelo y las observaciones.

TABLA 2. Valores ajustados de coeficiente cultural dual, K_{cb} , de la fracción de agotamiento de agua en el suelo p , y d los parámetros de evaporación del suelo

Papaya Calibración	
K_{cb} inicial	0,15
K_{cb} medio	1,00
K_{cb} final	0,60
P inicial	0,40
P desarrollo	0,40
P medio	0,40
P final	0,40
REW (mm)	8
TEW (mm)	38
Z_e (mm)	0,15

Los resultados obtenidos referentes a los coeficientes K_{cb} y K_e mejoran significativamente (en comparación con los K_c medios, Chaterlán *et al.*, 2010) la estimación de las fracciones de agua de precipitación y de riego utilizadas por la papaya durante el ciclo del cultivo, así como la cuantía de la parte del agua que es consumida por la planta por transpiración y la porción que es consumida por la evaporación desde el suelo, proporcionando una serie de alternativas para el control de la evaporación del suelo con mulches y coberturas activas.

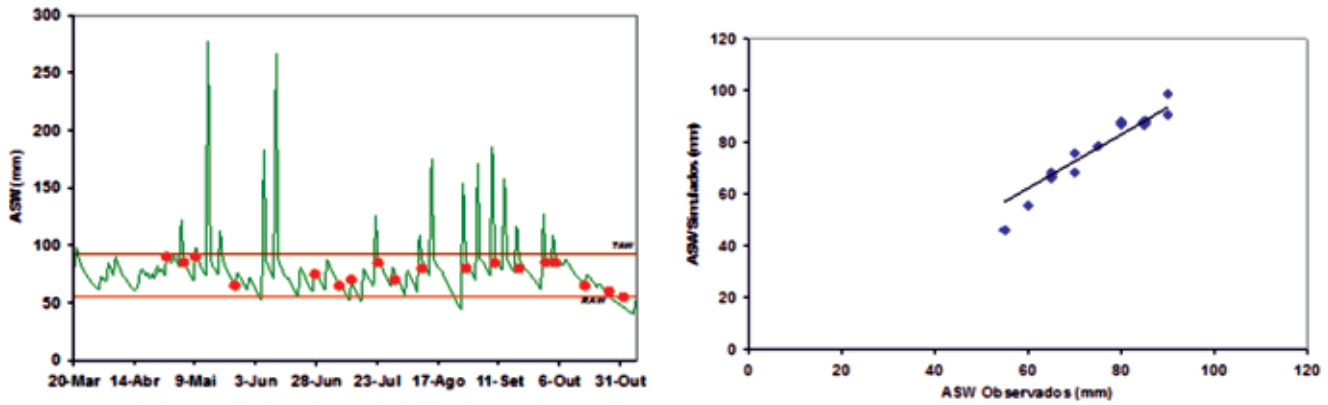


FIGURA 2. Comparación entre lo contenido de agua del suelo observado (●) y simulado (—). Regresión entre los valores observados y simulados para el cultivo de papaya en Cuba.

A partir de los valores recomendados de *REW* y *TEW* para suelos arcillosos (Allen *et al.*, 1998) se pudieron calibrar los mismos para este caso de estudio, utilizándose finalmente para la calibración valores de 38 y 8 mm respectivamente con $Z_c = 0,15$ m. El agotamiento inicial de la capa evaporable fue establecido en el 10% de *TEW* y el agotamiento en la profundidad radicular al 10% de *TAW*.

TABLA 3. Indicadores de calidad de ajuste del modelo aplicado usando los valores calibrados de *REW*, *TEW*, Z_c , K_{cb} y p

Indicadores	b	R ²	RMSE (mm)	AAE (mm)	ARE (%)	EF	d _{LA}
Papaya	1,04	0,94	5,11	4,39	5,3	0,76	0,96

Los resultados de los indicadores de calidad de ajuste calculados se resumen en la Tabla 3. En estos resultados, el coeficiente de regresión (b) está próximo de 1,0, entonces la covarianza está cerca de la varianza de los valores observados lo que significa que los valores simulados y observados están estadísticamente cerca; el coeficiente de determinación (R²) es 0,94 lo que indica que casi toda la variación de los valores observados se explica por el modelo. Los valores de los indicadores de errores de estimación residual del agua disponible del suelo, en el caso de la raíz del error cuadrado, RMSE [mm] es de 5,11 mm y el error absoluto promedio, AAE [mm] de 4,39,

lo que representa aproximadamente el 5% de *TAW*, muestran un buen ajuste. En su totalidad estos indicadores confirman una buena concordancia entre los valores simulados y observados.

Calendarios de riego mejorados

Teniendo en cuenta los resultados de la calibración, se pudo asumir que el modelo puede ser utilizado para la generación de calendarios alternativos de riego destinados a mejorar el ahorro de agua y la productividad de la papaya en estas condiciones edafoclimáticas.

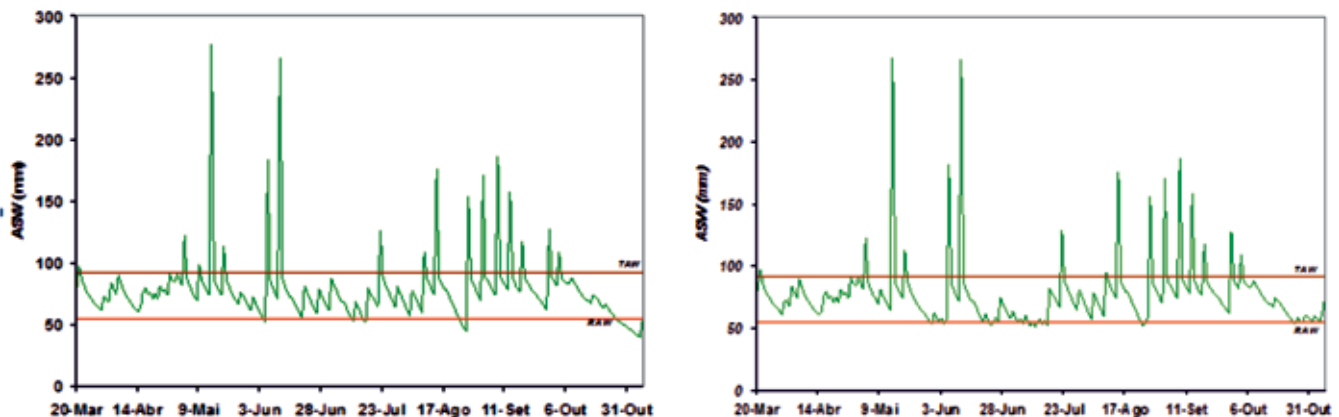


FIGURA 3. Simulaciones de los calendarios de riegos actuales y optimizados.

Fueron simulados calendarios de riego para mejorar la utilización del agua, controlar las pérdidas por percolación y paralelamente maximizar la productividad del cultivo, en la Figura 2, se hace una representación grafica de los resultados de estas simulaciones. Se tomo como lamina de riego fija $D = 8$ mm. Como se muestra en la Tabla 4, en estas condiciones ET_a está mucho más próxima de ET_c indicando que el stress hídrico no es aparente.

TABLA 4. Calendario de riego actual y optimizado cuando MAD = 8 mm

Componentes	Calendarios actuales	Calendarios optimizados
Riego (mm)	156,54	160,0
ASW _{mic.} (mm)	80,83	80,83
ASW _{fin} (mm)	52,66	72,88
Precipitación (mm)	1781,1	1781,1
ET _m (mm)	942,67	948,67
ET _a (mm)	938,46	946,78
RYL (%)	0,4	0,2

Transpiración y evaporación

Este modelo, SIMDualKc, brinda la posibilidad de realizar cálculos de los componentes de la ET_a, la evaporación del suelo (E) y la transpiración de las plantas (T). En la Tabla 5, son presentados los resultados obtenidos en términos de evaporación

del suelo y de la transpiración del cultivo en cada etapa del ciclo cultural. En la etapa inicial, la variable evaporación del suelo es el principal componente de ET_a lo que representa el 84% de ET_a en este período, esto corresponde al hecho que en esta etapa ocurre la mayor exposición del suelo a la radiación solar debido a la poca cobertura foliar desarrollada por el cultivo y al alto contenido de humedad en la capa de evaporación del suelo relacionado con numerosos eventos de precipitaciones acontecidos que acumularon valores alrededor de 137 mm. En la fase de crecimiento rápido, el nivel de influencia de ambas variables casi se iguala, la evaporación alcanza el 48% y la transpiración el 52%. Esta situación va transformándose en los restante periodos, es decir, en la medida que el cultivo va desarrollando su cobertura foliar el peso relativo de la evaporación va disminuyendo y es la transpiración del cultivo quien asume el mayor aporte en el proceso de evapotranspiración, este comportamiento está estrechamente relacionado a las características propias de la cobertura foliar de este cultivo. Estos resultados pueden apreciarse gráficamente en la Figura 4.

TABLA 5. Evaporación del suelo y transpiración del cultivo en cada etapa del ciclo vegetativo

	Etapa inicial		Crecimiento rápido		Etapa intermedia		Etapa final		Ciclo completo	
	E (mm)	T (mm)	E (mm)	T (mm)	E (mm)	T (mm)	E (mm)	T (mm)	E (mm)	T (mm)
Papaya	116	22	205	218	37	199	42	98	400	537

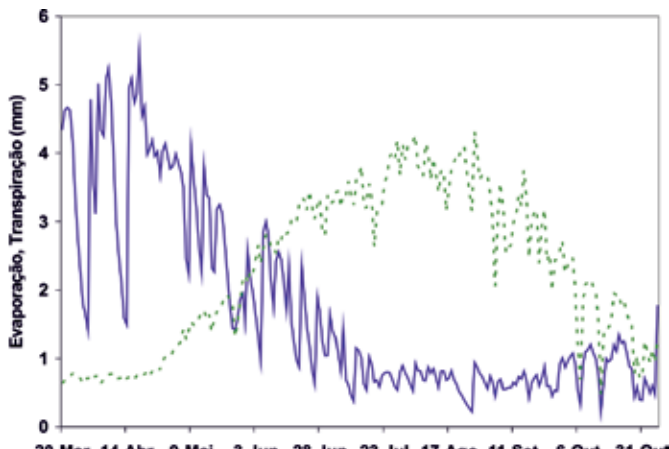


FIGURA 4. Variación de la evaporación del suelo (—) y la transpiración del cultivo (* *) durante el ciclo vegetativo.

Los resultados obtenidos en términos de coeficientes de evaporación del suelo K_e, coeficiente cultural basal K_{cb}, coeficiente cultural basal ajustado para estrés hídrico, K_sK_{cb}, riego y precipitación se presentan en la Figura 5.

En esta figura se muestra como el coeficiente de evaporación K_e es elevado en el período inicial, el mismo va disminuyendo en la medida que el cultivo va desarrollándose y queda menos área expuesta a la radiación solar, consecuentemente mostrando en el periodo final una ligera tendencia a aumentar. En este caso, las curvas de K_{cb} y K_{cb} ajustado para condiciones de estrés hídrico describen una trayectoria muy próxima. Se destaca la influencia de las abundantes precipitaciones durante todo el ciclo del cultivo.

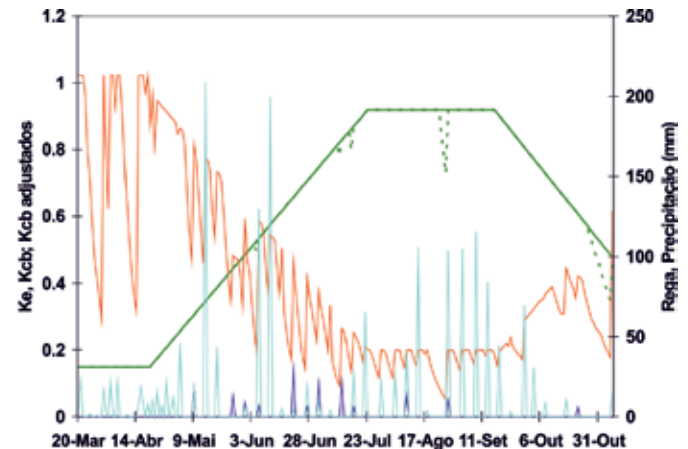


FIGURA 5. Variación del coeficiente de evaporación del suelo, K_e (—), coeficiente cultural basal, K_{cb} (—), coeficiente cultural basal ajustado para estrés hídrico, K_sK_{cb} (* *), precipitación (—) y riego (—).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos referentes a los coeficientes K_{cb} y K_e mejoran significativamente (en comparación con los K_c medios, la estimación de las fracciones de agua de precipitación y de riego utilizadas por la papaya durante el ciclo del cultivo, así como la cuantía de la parte del agua que es consumida por la planta por transpiración y la porción que es consumida por la evaporación desde el suelo, proporcionando una serie de alternativas para el control de la evaporación del suelo con mulches y coberturas activas.

Estadísticamente, los resultados obtenidos a partir de las regresiones lineales forzadas al origen y los indicadores de los

errores residuales de estimación indican un buen ajuste entre los valores de humedad de suelo estimados por el modelo y los datos observados.

Teniendo en cuenta los resultados de la calibración, se puede concluir que el modelo puede ser utilizado para la generación de calendarios alternativos de riego destinados a mejorar el ahorro de agua y la productividad de la papaya en estas condiciones edafoclimáticas.

Resulta oportuno destacar que estos son resultados preliminares, los cuales se pretenden precisar en próximos trabajos donde podamos contar con otros ensayos experi-

mentales que permitan realizar la validación de los valores aquí obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric-Cuba) por la facilitación de los datos utilizados en este estudio, al Centro de Engenharia dos Biosistemas (CEER) y a la Fundação para a Ciência y la Tecnologia (FCT), del Ministerio de la Ciencia y Enseñanza Superior, Lisboa, Portugal por todo el apoyo brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIYELAAGBE, I.O.O., M.O.A. FAWUSI, & O. BABALOLA: "Growth development and yield of pawpaw (*Carica persica* L.) 'Homestead selection' in response to soil moisture stress", *Plant and Soil*, 93: 427-435, 1986.
2. ALLEN, R.G.; L.S. PEREIRA; D. RAES & M. SMITH: *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, 300pp., FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 1998.
3. ALLEN, R.G.; A.J. CLEMMENS; C.M. BURT; K. SOLOMON & T. O'HALLORAN: "Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration", *J Irrig. Drain. Engng.*, 131: 24-36, 2005a.
4. ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA; M. SMITH; D. RAES & J.L. WRIGHT; "FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions", *J. Irrig. Drain. Engng.*, 131: 2-13, 2005b.
5. CAMPOSTRINI, E. & O.K. YAMANISHI: "Estimation of papaya leaf area using the central vein length", *Scientia Agricola*, 58(1): 39-42, 2001.
6. CAMPOSTRINI, E. & D.M. GLENN: "Ecophysiology of papaya: a review". *Braz. J. Plant Physiol.*, 19(4): 413-424, 2007.
7. CHATERLÁN, Y., G. HERNÁNDEZ; P. PAREDES; T. LÓPEZ; L.S. PEREIRA; R. MARTÍNEZ y O. PUIG: Estimation of the Papaya crop coefficients for improving irrigation water management in South of Havana. In: **28th International Horticultural Congress "Science and horticulture for people"**, Lisbon, 22-27 August 2010, Book of abstracts, Volume II (Symposia), 752 pp., 2010.
8. CHOLPANKULOV, E. D.; P. INCHEKOVA; P. PAREDES & L.S. PEREIRA: "Cotton irrigation scheduling in Central Asia: Model calibration and validation with consideration of groundwater contribution", *Irrig. and Drain.*, 57: 516-532, 2008.
9. DOS SANTOS, F.S.S.; V.A. VIANA; B.M. DE AZEVEDO; C.W. OLIVEIRA, e E.C. SOUSA: "Efeito de diferentes laminas de irrigação na cultura do mamão", *Eng. Agric.*, 28(4): 673-680, 2008.
10. HERNÁNDEZ, G.; R. MARTÍNEZ; O. PUIG; T. LÓPEZ y G. SOTOMAYOR: "Elementos agronómicos para el riego localizado en el cultivo del papayo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 12(2): 55-60, 2003.
11. KRUGER, J.A. & P.G. MOSTERT: *Irrigation*, pp. 50-59, In: Villiers, E.A. (eds) *The cultivation of papaya*. ARC, LNR, South Africa, 1999.
12. LÓPEZ, T. *Dinámica del agua en un suelo ferralítico rojo compactado del sur de la provincia La Habana. Tesis (en opción al título de Máster en Ciencias Agrícolas, Especialidad en Riego y Drenaje)*, Universidad Agraria de La Habana-IIRD, La Habana, Cuba, 1996.
13. MARLER, T.E. & H.S. CLEMENTE: "Papaya seedling growth response to wind and water deficit is additive", *HortScience*, 41(1): 96-98, 2006.
14. PEREIRA, L.S.: *Necessidades de Água e Métodos de Rega.*, Publ. Europa-América, Lisboa, 2004.
15. ROSA, R.D.; P. PAREDES; G.C., RODRIGUES; I. ALVES e L.S., PEREIRA: *Gestão do Risco em Secas. Métodos, Tecnologias e Desafios*, Edições Colibri e CEER, Lisboa, 2010.
16. TERRA DE ALMEIDA, F.; C. SALES MARINHO; E.F. DE SOUZA, e S. GRIPPA: "Expressão sexual do mamoeiro sob diferentes lâminas de irrigação na região norte fluminense", *Rev. Bras. Frutic.*, 25(3): 383-385, 2003.

*Todos nuestros servicios
a su disposición*

BIBLIOTECA ANTONIO MACHADO RUIZ

UNIVERSIDAD DE GRANMA (UGR)