

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo

Simulation the effect of the water stress in the sorghum in Red Ferralitic soils

Dr.C. Felicitá González-Robaina, Ing. Rosabel Delgado-Acosta, Ing. Yunier Díaz-Pérez, Dr.C. Julián Herrera-Puebla, Dr.C. Teresa López-Seijas, Dr.C. Greco Cid-Lazo

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana. Cuba.

RESUMEN. La predicción del rendimiento de cultivos ha sido un objetivo prioritario, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima-agua-suelo-cultivo, como para generar información que se pueda aprovechar en la planificación y manejo de la producción agropecuaria. *AquaCrop* es un modelo de simulación diseñado para el análisis de la productividad de diferentes cultivos en respuesta al agua disponible. El modelo realiza un balance de agua en el suelo y evalúa impactos del estrés hídrico sobre la producción. El objetivo del trabajo fue evaluar la capacidad predictiva del modelo bajo la condición de estrés hídrico en el cultivo de sorgo en suelo Ferralítico Rojo. Los datos se obtuvieron de experimentos de campo llevados a cabo en la estación experimental del IAgric, Alquízar. Entre los principales resultados se obtuvo que las predicciones del rendimiento de grano del modelo fueran buenas con un valor de 0,5 t ha⁻¹ para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*), con eficiencia de modelación de 0,80 e índice de Willmott (*d*) de 0,95. La simulación con estrés hídrico mostró una disminución en la cobertura del dosel, producción de biomasa y rendimiento del sorgo en un 11, 16,5 y 18,8% respectivamente con relación a la obtenida con riego sin estrés hídrico. Para las dos categorías de año seleccionado (seco y húmedo), con solo garantías de riego para suplir las etapas críticas del cultivo, el rendimiento agrícola en el año húmedo fue de 4,77 t ha⁻¹, un 16,6% superior al año seco.

Palabras clave: *AquaCrop*, rendimiento, planificación, producción de biomasa

ABSTRACT. The prediction of the yield of cultivations has been a high-priority objective, so much with the purpose of increasing the knowledge of the relationships climate-water-soil-cultivation, like to generate information that can take advantage in the planning and management of the agricultural production. *AquaCrop* is a simulation model designed for the analysis of the productivity of different cultivations in answer to the available water. The pattern carries out a balance of water in the floor and it evaluates impacts of the water stress on the production. The goal of the work was evaluate the model prediction capacity to simulate water stress for the sorghum in Red Ferralitic soil. The data were obtained of field experiments carried out in the experimental station of the Institute of Investigations of Irrigation and Draining, Alquízar. The grain yield predictions of the model were good with a value of 0,5 t ha⁻¹ for the root mean square error (RMSE), modeling efficiency of 0,80 and Willmott's index of agreement (*d*) of 0,95. The simulation with water stress showed a decrease of canopy cover, biomass production and yield of the sorghum in a 11, 16,5 and 18,8% respectively with relationship to the one obtained without water stress. For the two categories of selected year (dry and humid), with single watering guarantees to replace the critical stages of the cultivation the agricultural yield in the humid year was superior in 17,8% with values of 4,77 t ha⁻¹ in comparison to the dry one.

Keywords: *AquaCrop*, grain yield, schedule, biomass production

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola se lleva a cabo en un entorno caracterizado por el riesgo y la incertidumbre. Esto ocurre especialmente en zonas áridas y semiáridas, donde el suministro de agua procedente de las lluvias a los cultivos es variable y

errático. Aún en las áreas con riego, la escasez de agua afecta frecuentemente los rendimientos, por lo tanto, se requieren procedimientos y herramientas de modelación para predecir la respuesta de los cultivos a un determinado suministro de

agua, a fin de reducir la incertidumbre y manejar el riesgo (Delgado, 2017)¹.

Según Flores *et al.* (2013) la respuesta de los cultivos al déficit hídrico es compleja y usualmente se usan funciones empíricas para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico durante una parte o todo el ciclo del cultivo. Uno de los métodos más usados para estimar el rendimiento con parámetros empíricos, calibrados en experimentos de campo y niveles diferentes de estrés hídrico de los cultivos, es el desarrollado por Doorenbos y Kassam (1986).

Otra alternativa son los modelos de simulación biofísica de cultivos que manejan relaciones para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo con las características genéticas, agronómicas y condiciones ambientales durante el desarrollo de los cultivos (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Los modelos de simulación biológica pueden usarse para estimar la producción potencial e identificar factores limitantes de la producción o para analizar cambios en el manejo hídrico de los cultivos (López *et al.*, 2005).

El modelo *AquaCrop* liberado por la FAO (Raes *et al.*, 2011) puede usarse como herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en ciclos y localidades diferentes (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). El mismo ha sido desarrollado y orientado a cultivos anuales; separa por un lado la transpiración (vinculada a la productividad) de la evaporación del suelo, donde no hay intercambio de carbono asimilable (Steduto *et al.*, 2007) y diferencia el rendimiento final en biomasa e índice de cosecha.

En Cuba hay pocos trabajos publicados sobre este modelo, encontrándose los resultados de Tornés (2016)², quien se auxilió del modelo *AquaCrop* para evaluar las variables: coberturas foliar, biomasa seca aérea y contenido total de humedad del suelo para el diseño y manejo del riego por surcos en el cultivo del frijol en suelos Aluviales de la UBPC “Grito de Yara”, Granma. Demostrando la capacidad de simular de forma satisfactoria estas variables en comparación con las variables observadas de forma experimental.

Recientemente, Villalobos (2017)³ y Delgado (2017) calibraron y validaron el modelo *AquaCrop* para maíz y sorgo, respectivamente, en suelo Ferralítico Rojo en Alquizar, Artemisa. Los resultados de la calibración del modelo permitieron optimizar los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio, destacándose la duración de las fases fenológicas, el índice de cosecha, los límites de agotamiento de la reserva de agua para definir el estrés hídrico y la curva número para la determinación del escurrimiento superficial. Mientras que la validación demostró la precisión de los parámetros calibrados para la simulación

de biomasa, cobertura vegetal y rendimiento, con valores de eficiencia de simulación superiores a 0,83, errores cuadráticos medios menores al 10% y coeficientes de determinación por encima de 0,91.

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es un cultivo autóctono de África, es el quinto cereal más importante en el mundo, después del trigo, el arroz, el maíz y la avena. Se ha adaptado bien a los climas tropicales, con varios rasgos que lo hacen un cultivo tolerante a la sequía, que sobrevive en condiciones climáticas adversas; por esto con frecuencia queda relegado a suelos pobres y manejo con bajos insumos (Steduto *et al.*, 2012).

En el caso del sorgo cuando ocurre estrés hídrico en la siembra y comienzo de la floración, durante la floración, formación y desarrollo del grano, ocasiona reducciones significativas en el índice de cosecha, los componentes del rendimiento y en la producción total (Canet *et al.*, 2016).

El objetivo del trabajo fue evaluar la capacidad predictiva del modelo bajo la condición de estrés hídrico en el cultivo de sorgo en suelo Ferralítico Rojo.

MÉTODOS

Se utilizó en la simulación los datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (diciembre-abril) en el período 1986-1987, en la Estación Experimental del antes Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, actualmente IAgriC, en Alquizar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' W, altura sobre el nivel medio del mar 6 m.

La fecha de siembra del sorgo (variedad enana) fue 13 de diciembre del 1986, bajo un sistema de riego por surcos. Las temperaturas umbrales variaron en el rango de 6,4 a 31 °C, la madurez se alcanzó 118 días después de la siembra, la densidad de población fue 150 000 plantas ha⁻¹ y el rendimiento máximo fue de 4,95 t ha⁻¹. Una descripción más detallada de los procedimientos experimentales para la estimación de los consumos de agua aparece en el trabajo publicado por Herrera *et al.* (2016).

La ventana principal del modelo *AquaCrop* (versión 3.1, enero 2010) presenta un grupo de módulos que permiten ingresar las variables externas, las variables de estado y los parámetros conservativos. Para la simulación del crecimiento del cultivo de sorgo se utilizaron los parámetros conservativos o constantes del modelo *AquaCrop*, calibrados y validados por Delgado (2017) para las mismas condiciones de suelo, clima y cultivo de este estudio. En la Tabla 1 se presentan los parámetros más importantes usados en la simulación.

¹ DELGADO, R.: Modelación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo, 86pp., Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico Universidad Tecnológica de La Habana, Centro de Investigación de Hidráulica (CIH), CUJAE, Marianao, La Habana, La Habana, Cuba, 2017.

² TORNÉS, O.: Parámetros de diseño y manejo del riego por surcos en el cultivo del frijol (*Phaseolus Vulgaris* L.) en suelos fluvisoles, 145pp., Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba, 2016.

³ VILLALOBOS, M. A.: Modelación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del maíz en suelo Ferralítico Rojo, 76pp., Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico Universidad Tecnológica de La Habana, Centro de Investigación de Hidráulica (CIH), CUJAE, Marianao, La Habana, La Habana, Cuba, 2017.

TABLA 1. Parámetros utilizados en la simulación del crecimiento del cultivo de sorgo utilizando el modelo *AquaCrop* para suelo Ferralítico Rojo, Artemisa, Cuba

Parámetro	Valor usado
Densidad de plantación (plantas ha⁻¹)	150 000
Cobertura inicial del dosel	0,75
Expansión del dosel (% día ⁻¹)	13,6
Declive del dosel (% día ⁻¹)	12,8
Emergencia (días después de plantación)	10
Máxima cobertura del dosel (días después de plantación)	63 días
Inicio de la senescencia (días después de plantación)	109
Longitud de florescencia (días después de plantación)	68
Madurez (días después de plantación)	118
Máxima profundidad efectiva radicular (m)	0,40
Máxima profundidad radicular (días después de plantación)	99
Máxima evapotranspiración del cultivo (mm día ⁻¹)	1,15
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	30
Índice de cosecha (HI) (%)	43
Función de expansión del dosel	Tolerante al estrés de agua
P-upper	0,20
P-lower	0,55
Forma	3,0
Función del cierre de los estomas	Moderadamente tolerante
P-upper	0,5
Forma	3,0
Función de la senescencia temprana del dosel	Moderadamente tolerante
P-upper	0,65
Forma	3,0
Efectos de la fertilidad	Considerado un 10%
Efectos de la temperatura	No considerado
Curva número	71
Rapidez de la evaporación del agua (capa de superficie de tierra evaporándose: 0,04 m)	10
Capa impermeable de suelo (m)	0,4

El índice de cosecha (HI) considerado fue de 43%, por ser el valor más común obtenido bajo condiciones óptimas de desarrollo durante la calibración del modelo. Este valor se encuentra en el rango (0,3 y 0,5) que propone Wani *et al.* (2012).

El modelo tiene predeterminado el valor de la productividad del agua normalizada para sorgo de 33,7 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2011). Para mejorar las predicciones del modelo fue necesario reducir este valor a 30 g m⁻².

La productividad del agua normalizada para biomasa (WP*) es casi constante para un cultivo cuando los nutrientes minerales no son limitantes, independientemente del estrés hídrico. La reducción de la WP* es posible que sea a causa de deficiencias nutricionales, particularmente de nitrógeno (Steduto *et al.*, 2012).

El modelo *AquaCrop* consta de varias ecuaciones que, con datos de clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo (Raes *et al.*, 2009).

Los datos climáticos fueron tomados de la estación meteorológica localizada en el área experimental. Las variables

climáticas se comportaron de la siguiente manera: la temperatura media mínima y máxima variaron entre los 7 y 29 °C, respectivamente, la lluvia total para los meses en estudio fue de 210,7 mm. El mayor valor de precipitación caída correspondió al mes de diciembre de 1986 con un total de 103 mm, y el de menor fue enero con solo 5 mm.

La Evapotranspiración de referencia (ET_o) tuvo un valor total para los meses en estudio de 342,45 mm. El promedio mensual es de 3,02 mm día⁻¹ y los máximos y mínimos corresponden al mes de abril (4,39 mm día⁻¹) y diciembre (1,43 mm día⁻¹) respectivamente. En la Figura 1 se muestra el balance hídrico decenal de precipitación y ET_o para la zona y meses en estudio, lo que coincide con la época seca del año. Este balance hídrico es negativo para nueve decenas (75 %) de un total de doce existentes en el periodo de estudio, por lo que el riego es imprescindible para la obtención de buenos rendimientos agrícolas.

El suelo de la estación es Ferralítico Rojo compactado y las propiedades físicas fundamentales para cada capa del perfil de este suelo han sido reportadas y actualizadas por Cid *et al.* (2011) (Tabla 2) y conforman el fichero de suelo que se utilizó para todas las corridas del modelo.

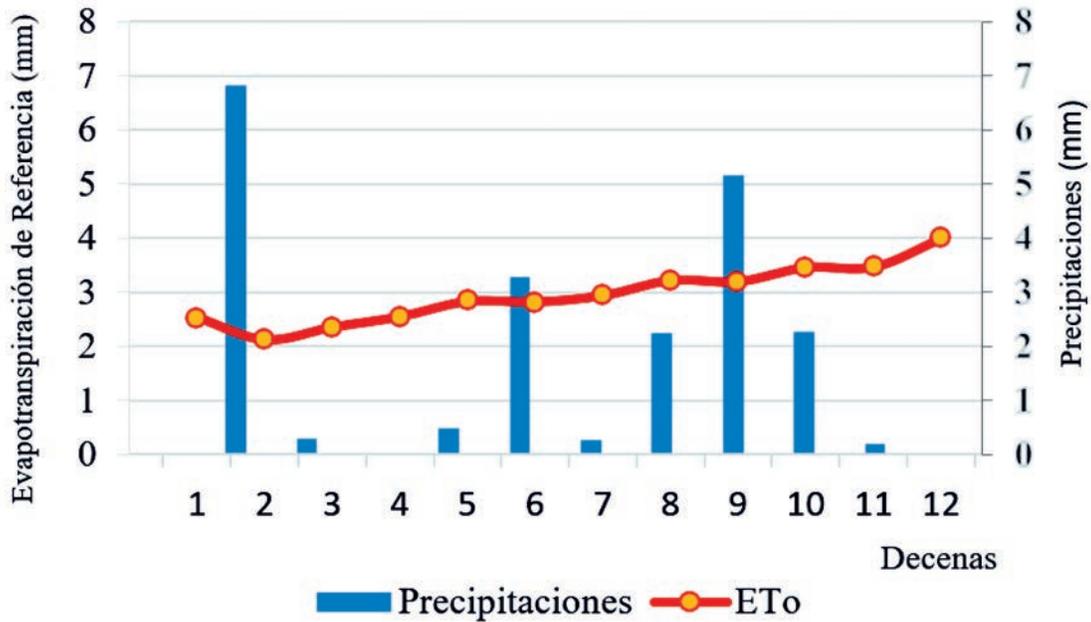


FIGURA 1. Balance hídrico para los meses de diciembre-abril del año 1986-1987.

TABLA 2. Análisis granulométrico y otras propiedades y parámetros físicos e hidrofísicos del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado

Prof. (m)	Arena %	Arcilla %	Limo %	da a θ_{FC} (kg m ⁻³)	θ_{FC} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{WP} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{satur} (cm ³ cm ⁻³)	K_{sat} (m h ⁻¹)	Pt (%)	$V_{inf. básica}$ (m día ⁻¹)
20	20,9	57,4	21,7	1,18	0,394	0,28	0,537	1,02	53,73	
40	17,7	61,8	20,5	1,28	0,431	0,288	0,494	0,6	49,41	
60	28,9	62,8	14,3	1,2	0,397	0,274	0,528	0,48	52,76	4,9
80	20,3	61,4	18,3	1,2	0,396	0,285	0,516	0,39	51,61	
100	20,1	61,5	18,4	1,2	0,396	0,286	0,516	0,39	51,61	

Nota: $da a \theta_{FC}$ densidad volumétrica o aparente del suelo en determinada θ_{FC} ; θ_{FC} contenido de agua en el suelo correspondiente a capacidad de campo; θ_{wp} contenido de agua en el suelo correspondiente al punto de marchitez permanente; θ_{sat} contenido de agua en el suelo a la saturación; K_{sat} conductividad hidráulica del suelo saturado; Pt porosidad total del suelo; $V_{inf. básica}$ velocidad de infiltración básica en el suelo.

Según estos autores de acuerdo a su funcionamiento hídrico, el suelo presenta un comportamiento diferenciado en la capa de 0-20 cm con respecto a los valores de densidad aparente, el proceso de retención de humedad y de la conductividad hidráulica. A partir de los 40 cm hay una capa más compactada que diferencia estos procesos hidrodinámicos.

De acuerdo con López *et al.* (1998) este suelo pertenece al grupo A de los suelos cubanos por clases hidrológicas (cultivo en hileras, surcos rectos y condiciones hidrológicas malas, debido a la compactación del suelo), por lo que se adoptó la curva número (CN) 71 para representar el escurrimiento superficial y se consideró que no existe estancamiento de agua en superficie.

A falta de datos de campo de la cobertura del follaje, la

misma fue determinada apartir de la relación empirica entre índice de área foliar y cobertura propuesta por Araya *et al.* (2016) para sorgo (expresión 1).

$$(CC=1,00 \times [1-\exp(-0,6 LAI)]^{1,2}) \quad (1)$$

Una descripción más detallada de las principales características de *AquaCrop* aparece en el *Boletín* de la *FAO: Riego y Drenaje* N° 66 (Steduto *et al.*, 2012); donde se explica detalladamente los conceptos básicos y los procedimientos fundamentales de cálculo, acompañados de descripciones adicionales relacionadas con los requerimientos de datos de entrada, la interfaz del usuario y los resultados del modelo.

Condiciones iniciales

Se debe especificar el contenido de agua de las capas del perfil del suelo al comienzo del período de simulación, si no es a la capacidad de campo. Se consideró un contenido de agua en el suelo de 0,35 cm³ cm⁻³, que representa el 90% del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (0,39 cm³ cm⁻³) hasta una profundidad de 0,40 m descrito anteriormente en la Tabla 2.

Aplicaciones

Se simuló una producción potencial, máximo rendimiento posible sin ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura. Se estudió el efecto del estrés hídrico en la etapa vegetativa. Luego se simuló la producción ajustada a la disponibilidad hídrica durante el ciclo para las dos categorías de años seleccionadas de una serie de 20 años (1985-2005), para la probabilidad de ocurrencia del 25% año húmedo (1999) y del 90% año seco (1989) (Chaterlán, 2012)⁴.

El indicador de estrés es el agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular (Dr), expresados como fracciones (p) del agua disponible total en el suelo (TAW). El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal y 3) cierre estomático. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta, el modelo considera una curva que se activa al alcanzar límites establecidos para la humedad del suelo y ajusta los umbrales de la curva según la ETo diaria, como medida de la demanda evaporativa de la atmósfera (Steduto *et al.*, 2012).

Se compararon los valores de cobertura del dosel, biomasa y rendimiento, reales y los simulados con los parámetros de entrada. Los índices utilizados para analizar la precisión de la simulación del modelo fueron: coeficiente de determinación R² del ajuste lineal, la pendiente en 1:1, y los estadígrafos: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), la eficiencia de modelación (EF) y el índice de Willmott (d) de acuerdo con Willmott (1982), citado por Flores *et al.* (2013), y se calcularon con las siguientes expresiones 2, 3 y 4:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \tag{2}$$

$$EF = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{3}$$

$$d = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n \left(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \right)^2} \tag{4}$$

donde: Si y Oi son los valores simulados y observados, n es el número de observaciones y \bar{O} es la media de los valores de Oi.

De acuerdo con Heng *et al.* (2009) y Flores *et al.* (2013) es factible utilizar las ecuaciones anteriores, ya que: la RMSE representa una medida global entre los valores observados y simulados, es decir, un indicador de la incertidumbre, debido a que toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un desempeño bueno en la simulación. EF tiene como valor máximo y óptimo 1. Si EF es menor que 0 el modelo predice peor que utilizando el valor medio de los datos observados. El valor d varía de 0 a 1 y en ambos análisis se aplicó secuencialmente a los datos observados y simulados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la simulación del máximo rendimiento posible sin ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura, para sorgo en suelo Ferralítico Rojo compactado en Alquizar. Los valores de rendimiento están en el intervalo publicado en trabajos precedentes de González *et al.* (2014). En el caso particular del rendimiento en experimentos de campo este varió entre 3,5 y 5 t ha⁻¹.

TABLA 3. Resultados de la simulación de la producción potencial del sorgo

Producción (t ha ⁻¹)		Parámetros de balance de agua en el suelo (mm)		Productividad del agua (kg m ⁻³)	
Biomasa seca	11,0	Evaporación total	103,6	Biomasa	4,88
		Transpiración	121,8		
		Escorrentía	0		
Rendimiento	4,73	Infiltración	437,7	Rendimiento	2,10
		Drenaje	177,7		

Mientras que la productividad en base al rendimiento fue superior al rango obtenido por estos autores (1,02 y 1,48 kg m⁻³). Este valor superior de productividad puede estar asociado a errores en el método simplificado de cálculo de los balances

hídricos para la determinación de la ET utilizados en el experimento de campo consultado. Según López *et al.* (2003) la sobrestimación de la ET con el uso del balance simplificado puede alcanzar valores que están entre 15% y 55% y la predic-

⁴ CHATERLÁN, D. Y.: Precisión en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Caso de estudio: cultivos de ajo y cebolla en las condiciones edafoclimáticas del sur de Artemisa, 143pp., Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias), Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAGric), Arroyo Naranjo, La Habana, Cuba, 2012.

ción de la humedad del suelo, incrementos en los errores entre 1,1 y 14 veces.

En la Figura 2 se presenta la salida principal del modelo *AquaCrop* para el cultivo de sorgo. Se puede apreciar una reduc-

ción en el desarrollo de la biomasa potencial debido a un estrés de fertilidad del cultivo del 10%. La salida del modelo también indica que el suelo estuvo a capacidad de campo en casi todo el ciclo de cultivo, no presentando estrés hídrico.

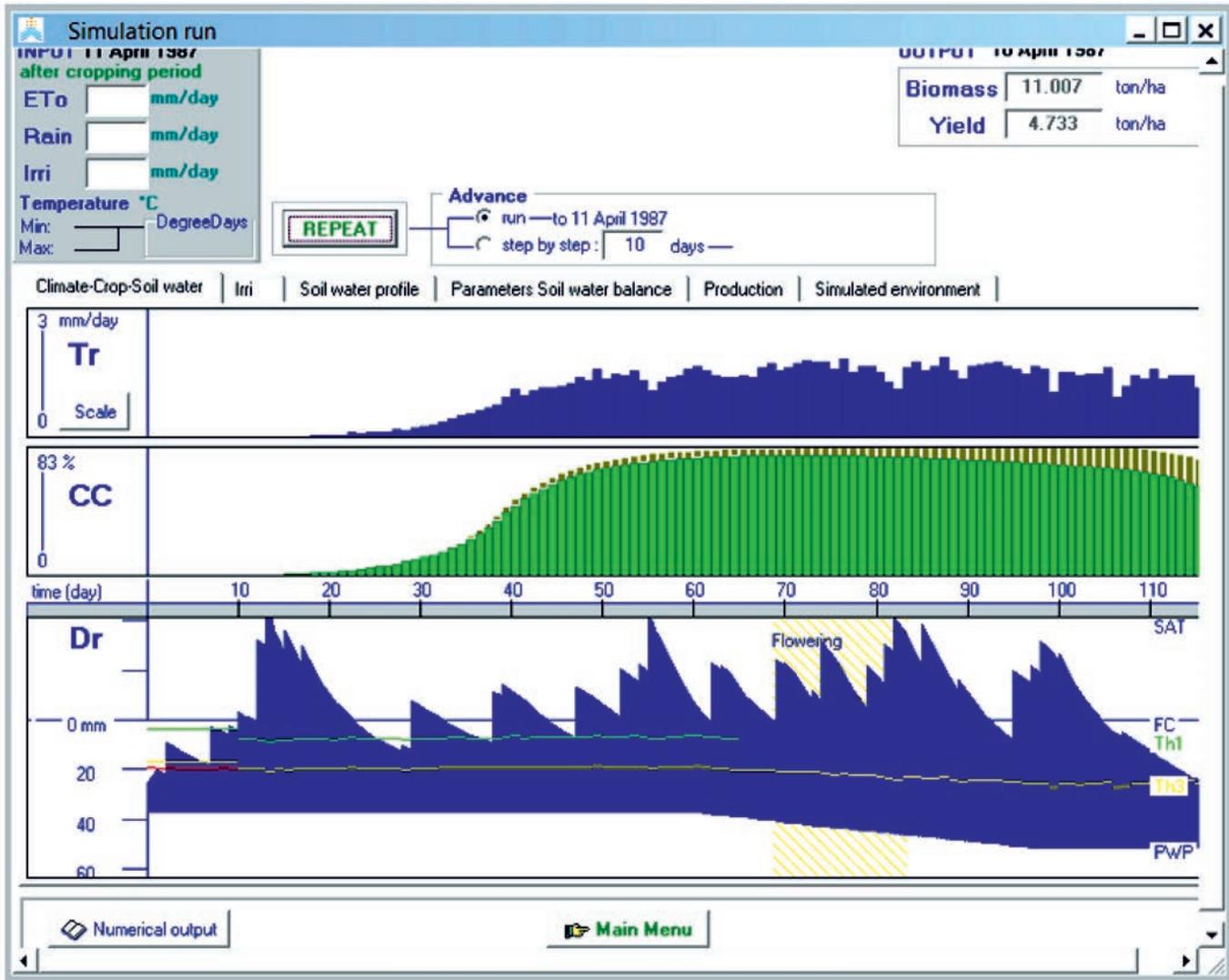


FIGURA 2. Salida principal de la simulación del rendimiento potencial del sorgo con *AquaCrop*.

La Figura 3 presenta el seguimiento de la cobertura vegetal (CC) para la variedad enana del cultivo de sorgo, bajo las condiciones ambientales de Alquízar, en la siembra de diciembre 1986 - abril 1987, sin límites de agua y usando un nivel de fertilidad del suelo en el modelo de 90%.

Se observa como el seguimiento de la cobertura vegetal, estimada a partir de los valores medidos en campo del índice de área foliar y el seguimiento diario del follaje simulado con el modelo *AquaCrop*, presentan similitud a lo largo de todo el ciclo del cultivo; el CC se incrementó diariamente hasta el momento de la floración, donde cesa el crecimiento vegetativo y se presenta el máximo CC, inicia el crecimiento reproductivo y tiene la mayor tasa de decaimiento en la senescencia. Se encontró así que el valor del CC final, determinado con datos experimentalmente fue de un 60%,

mientras que el simulado fue de 63%, presentándose una diferencia de solo un 3%. (Figura 3).

Adicionalmente, el seguimiento de la biomasa seca simulada con el modelo y medida en campo muestra valores para esta variedad de 10,5 t ha⁻¹ y de 9,8 t ha⁻¹, respectivamente a los 112 días, presentando una diferencia de 0,67 t ha⁻¹, lo que representa en términos porcentuales menos del 6%. Los resultados indican que las predicciones de la biomasa seca del modelo fueron buenas ($RMSE=1,09$ t ha⁻¹, $EF=0,88$ y $d=0,957$).

En la Tabla 4 se exponen los estadígrafos seleccionados para analizar la precisión del modelo en el cultivo de sorgo para las variables de salida: biomasa seca, rendimiento y cobertura vegetal.

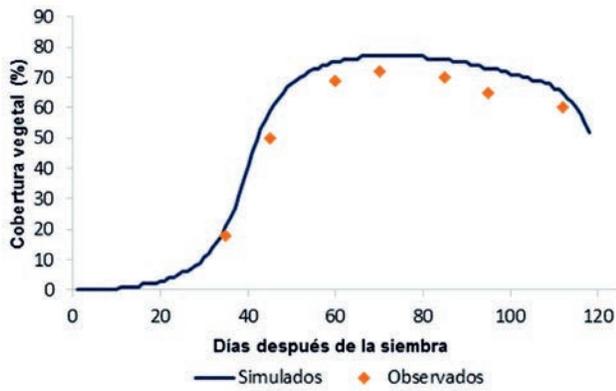


FIGURA 3. Seguimiento del comportamiento de la cobertura vegetal medida en campo y simulada con *AquaCrop* en sorgo variedad enana, bajo las condiciones de Alquízar.

TABLA 4. Estadígrafos seleccionados para analizar la precisión del modelo

Estadígrafo	Variables de salida		
	Biomasa	Rendimiento	Cobertura
RMSE	1,09	0,5	6,28
EF	0,88	0,80	0,87
<i>d</i>	0,96	0,95	0,97
<i>r</i>	0,96	0,97	0,99
pendiente	0,89	1,18	0,91
R ²	0,91	0,93	0,98

La raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un desempeño bueno en la simulación, lo que sucede para las tres variables de salida. La eficiencia está cercana a 1, que es el valor óptimo y *d* está en el rango establecido (entre 0 y 1).

El anterior comportamiento se corrobora a través del coeficiente de correlación con valores de 0,91, 0,93 y 0,98, respectivamente, una relación fuertemente significativa (valores

de probabilidad menores a 0,05) entre el seguimiento de las variables simuladas y las variables determinadas a nivel de campo.

En la Figura 4 se muestra la relación lineal entre los valores observados y simulados de rendimiento, con un coeficiente de determinación de 0,93, una pendiente muy próxima a 1 y ordenada 0, asegurando que la condición inicial del rendimiento estimado se asemeja estrechamente a las mediciones de campo.

Estos resultados demuestran que el modelo *AquaCrop* explica adecuadamente el desarrollo del crecimiento de sorgo, evaluado bajo las condiciones ambientales y edáficas de Alquízar. Coincidiendo con la propuesta de Araya *et al.* (2016) de que el modelo puede ser usado para simular el rendimiento y la biomasa del sorgo.

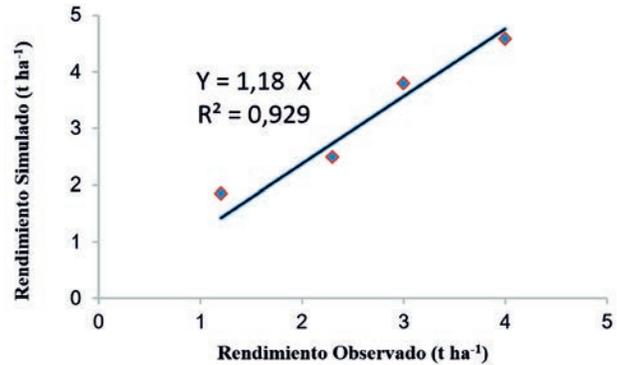


FIGURA 4. Relación entre rendimiento observado y simulado para el cultivo de sorgo.

Estrés en la etapa vegetativa

En la Tabla 5 se muestran las salidas obtenidas para la simulación de la producción de biomasa y rendimiento del sorgo con estrés hídrico antes de la floración, donde solo se aplicaron 3 riegos para garantizar la germinación. En el resto del ciclo las necesidades hídricas del cultivo fueron suplidas por las precipitaciones (210,7 mm). Se presentan también algunos parámetros de balance de agua en el suelo y de productividad del agua

TABLA 5. Salidas del modelo para la simulación del cultivo de sorgo con estrés hídrico antes de la floración

Producción (t ha ⁻¹)		Parámetros de balance de agua en el suelo (mm)		Productividad del agua (kg m ⁻³)	
Biomasa seca	9,18	Evaporación total	116	Biomasa	4,21
		Transpiración	101,9		
		Escorrentía	-		
Rendimiento	3,98	Infiltración	253,7	Rendimiento	1,83
		Drenaje	66,8		

La lámina de riego total aplicada durante este periodo fue de 43 mm. Un estrés hídrico muy leve, que se prolongue por muchos días, puede redundar en una cobertura del dosel mucho menor durante la etapa vegetativa. Según Steduto *et al.* (2012), si el estrés es lo suficientemente severo, la conductancia estomática también se reduce y a un nivel similar de estrés, la senescencia de las hojas más viejas se empieza a acelerar. Por supuesto, esta situación provoca directamente la reducción de la tasa de producción de biomasa y, por ende, la disminución del rendimiento de grano.

La variante sin estrés (Figura 2) no se ve afectada de forma alguna en la disminución del crecimiento foliar, conductancia estomática y senescencia temprana, alcanzándose así su máxima producción potencial. Sin embargo, para el caso de la simulación con estrés provocado (Figura 5A), se redujo la expansión del crecimiento foliar en un 100% a los 56 y 78 días después de plantado. Mientras que el cierre de los estomas y la senescencia temprana en un 39 y 6%, respectivamente. Lo que pudiera estar dado por

las pocas precipitaciones ocurridas (8 mm) en ese periodo de desarrollo vegetativo del cultivo (Figura 5B). De acuerdo con esto, los valores de cobertura simulados ponen de manifiesto que cada cultivo experimenta durante su ciclo biológico condiciones de crecimiento particulares.

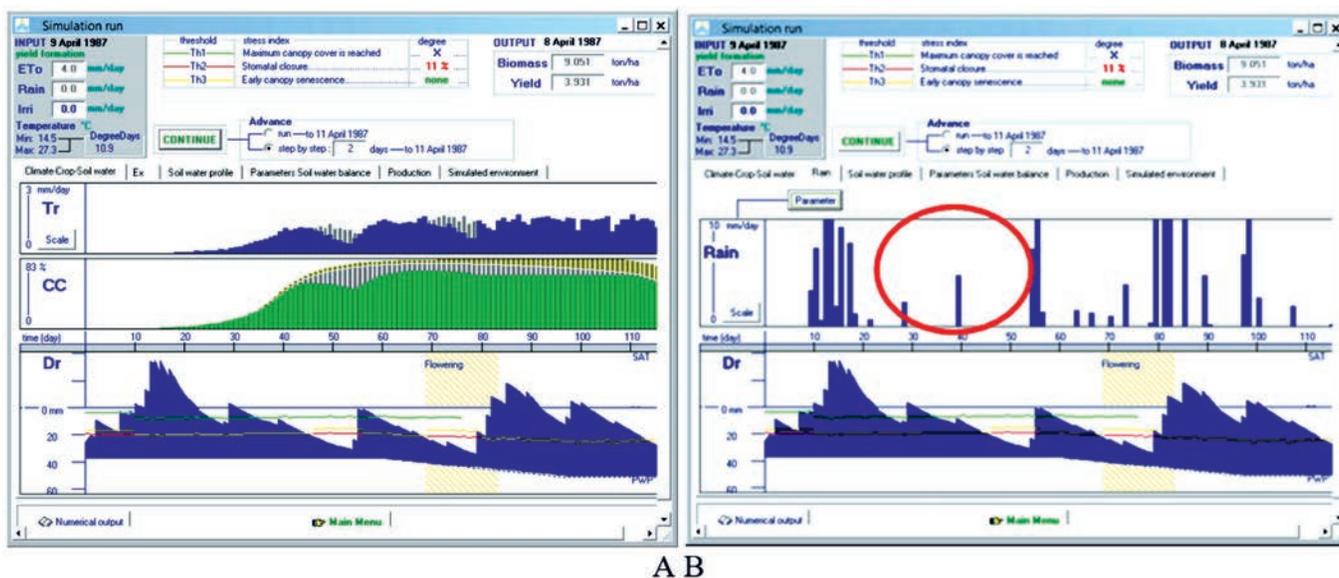


FIGURA 5. Salida del modelo: A- con estrés antes de la floración. B- precipitaciones y disponibilidad de agua en el suelo durante todo el ciclo.

La transpiración se redujo de 1,1 a 0,4 mm día⁻¹, provocando reducción del rendimiento en un 15,8%. Desde el punto de vista del número de riegos y las normas totales esta reducción estuvo en un 72 y 81% respectivamente (11 riegos a 3, de 226,5 mm a 43 mm). A partir de los 80 días la cantidad de agua aportada por la lluvia y su distribución permitieron una recuperación del cultivo, por lo que la reducción en cuanto a productividad en base al rendimiento fue del 13%.

La cobertura vegetal del cultivo se ve restringida en la medida que la disponibilidad de agua se reduce por debajo de algún límite crítico de la fracción de agua útil, influyendo en la producción de biomasa y a su vez en el rendimiento. Para este análisis en particular, el sorgo se consideró un cultivo relativamente más sensible al estrés hídrico respecto al parametrizado por Araya *et al.* (2016). De acuerdo con esto, la influencia del estrés sobre la expansión del crecimiento foliar, conductancia estomática y senescencia temprana se representó en la corrida realizada.

Autores como: Namuco y O’Toole (1986), Lamm *et al.* (1994), Otegui *et al.* (1995) y Steduto *et al.* (2012) no recomiendan estrés hídrico durante la floración y llenado del grano, debido a que provoca directamente la reducción de la tasa de producción de biomasa, y por tanto muy bajos o incluso cero rendimiento.

Producción ajustada por limitación de agua en año seco y húmedo

En la Tabla 6 se muestran las salidas obtenidas para la simulación de la producción de biomasa y rendimiento del sorgo para las dos categorías de año seleccionado (seco y húmedo). Se aplicaron 4 riegos (58 mm) para garantizar la germinación en el año seco, mientras que en el año húmedo solo fue necesario

aplicar 3 riegos (43 mm) para garantizar la germinación. En el resto del ciclo las necesidades hídricas del cultivo fueron suplidas por las precipitaciones, que alcanzaron valores de 297,5 mm en el año seco (1989) y 522 mm en el húmedo (1999).

TABLA 6. Salidas del modelo para la simulación del cultivo de sorgo para año seco y año húmedo

Variables de salida	Año seco	Año húmedo
Biomasa seca potencial (t ha ⁻¹)	11,2	11,6
Biomasa seca (t ha ⁻¹)	9,8	11,09
Rendimiento (t ha ⁻¹)	3,98	4,77
Riego (mm)	58	43
Precipitaciones (mm)	297,5	522
Transpiración (mm)	102,3	133,5
Productividad de agua (WP _B) (kg m ⁻³)	4,37	5,29
Productividad de agua (WP _v) (kg m ⁻³)	1,87	2,28

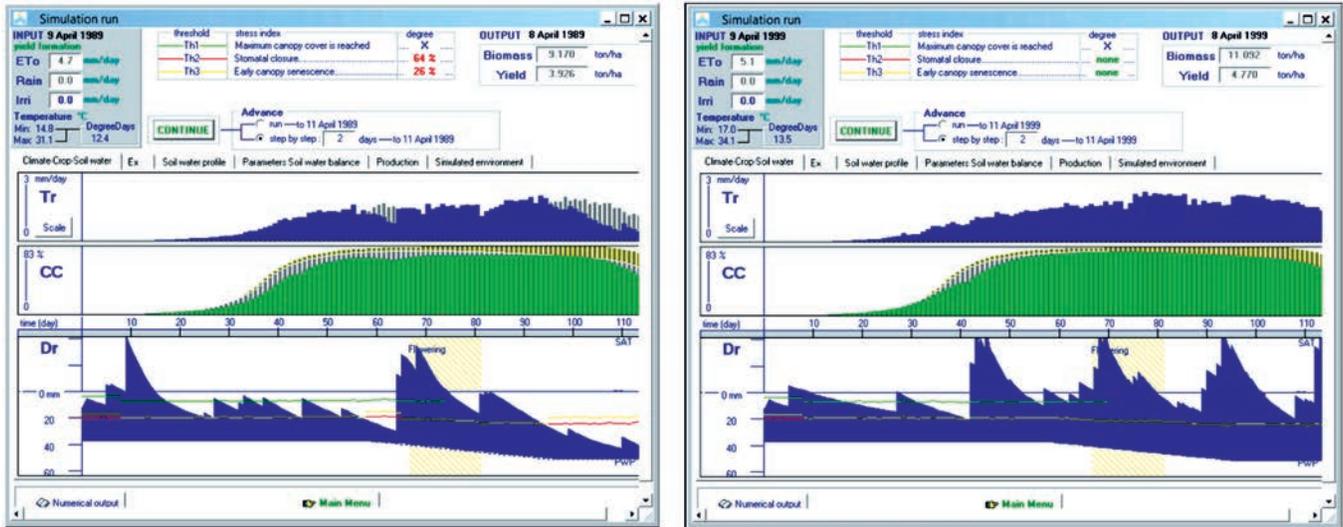
Para el caso de la simulación, en el año seco, la reducción de la expansión del crecimiento foliar se vio afectada en un 67% a los 46 días y en un 100% a los 68 días después de plantado, 50% de cierre de los estomas y 17% senescencia temprana, lo que repercute en la biomasa y rendimiento con valores alcanzados de 9,8 y 3,98 t ha⁻¹, respectivamente.

En la Figura 6 se comparan las salidas del modelo Aqua-Crop para las dos categorías de año. En el año húmedo el rendimiento fue superior en un 16,6% en comparación al seco, obteniéndose resultados de 4,77 t ha⁻¹, con valores de productividad para biomasa y rendimiento también superiores debido a las aplicaciones de riego que fueron mínimas. A los 32 y 46 días después de sembrado, el sorgo presentó índice de estrés de un 12 y 67%, respectivamente, en la expansión del crecimiento

foliar; no afectándose el rendimiento final por el aporte significativo de las precipitaciones en el resto del ciclo del cultivo.

De acuerdo con esto, los valores de rendimiento simulados ponen de manifiesto que cada cultivo experimenta durante su ciclo biológico condiciones de crecimiento

particulares en función del comportamiento de las precipitaciones. Estos valores de producción pueden considerarse como referentes de la capacidad productiva del ambiente de la zona estudiada y pueden resultar de gran utilidad en la programación de riego.



A B

FIGURA 6. Salida del modelo para sorgo para: A: año seco y B: año húmedo.

CONCLUSIONES

- La precisión obtenida en la simulación potencial de biomasa seca, cobertura vegetal y rendimiento, con valores de eficiencia de simulación superiores a 0,8, errores cuadráticos medios menores al 10% y coeficientes de determinación por encima de 0,9, demuestran que el modelo *AquaCrop* explica adecuadamente el desarrollo del crecimiento de sorgo, evaluados bajo las condiciones ambientales de suelo Ferralítico Rojo en Alquizar.
- La simulación con estrés hídrico mostró una disminución en la cobertura del dosel, producción de biomasa seca y rendimiento del sorgo en un 11%; 16,5% y 18,8%, respectivamente con relación a la obtenida sin estrés hídrico, manifestándose que cada variante experimenta durante su ciclo biológico

condiciones de crecimiento particulares.

- Los resultados de la simulación por limitación de agua en un año seco definió una reducción de la expansión del crecimiento foliar del 67% a los 46 días de plantado y a los 68 días de plantado se reduce al 100%, mientras que el cierre de los estomas fue al 50% y la senescencia temprana al 17%, lo que repercutió en la disminución de la producción de biomasa seca y rendimiento entre 11 y 16%, respectivamente.
- Para un año húmedo la simulación del estrés hídrico en el sorgo presentó un índice en la expansión del crecimiento foliar de un 12 y 67% a los 32 y 46 días después de sembrado, respectivamente; no afectándose el rendimiento final por el aporte significativo de las precipitaciones, con rendimientos superiores en un 17% en comparación con el año seco.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAYA, A.; KISEKKA, I.; HOLMAN, J.: *Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop*. Irrig Sci, DOI 10.1007/s00271-016-0515-7, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 17pp. 2016.

CANET, R.; RIVERO, L.; ARMENTEROS, M.: *Guía técnica para el cultivo del sorgo (Sorghum bicolor L. Moench)*. Instituto de Investigaciones de Granos. ISBN: 978-959-7248-03-3, 36 pp., 2016.

CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUÍZ, M.: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, RNPS-0111, 20(2): 42-46., 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.: *Yield response to water*. Irrigation and Drainage, Paper 33, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 193 pp., ISBN 92-5-300744-3, 1986.

FLORES, G., H., B. OJEDA, H. FLORES, E. SIFUENTES, E. MEJIA: Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo *Aquacrop*, *Agrociencia*, ISSN 1405-3195, 47(4): 347-359, 2013.

GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; LÓPEZ, T.; CID, G.: "Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, RNPS-0111, 23(4) (octubre-noviembre-diciembre): 21-27, 2014.

- HENG, L.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T. AND STEDUTO, P.: "Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize", *Agron. J.*, ISSN 0002-1962, 101(3): 488-498, 2009.
- HERRERA, J.; OSORIO, M.; GONZÁLEZ, F.; DÍAZ, Y.: "Respuesta del sorgo (*Sorghum vulgare* L. Monech) al riego y la fertilización nitrogenada en dos épocas de siembra", *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, 6(3): 3-10, (julio-agosto-septiembre), 2016.
- HSIAO, T.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D. AND FERERES, E.: AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.*, ISSN 0002-1962, 101(3): 448-459, 2009.
- LAMM, F.; ROGERS, D.; MANGES, H.: "Irrigation scheduling with planned soil water depletion", *Trans. of the ASAE*, ISSN: 0001-2351, 37: 1491-1497, 1994.
- LÓPEZ, G.; HERRERA, J.; CASTELLANOS, A.: "Agrupamiento de los suelos cubanos en clases hidrológicas para el cálculo del escurrimiento mediante el método de la curva número", *Ingeniería Hidráulica*, vol. XIX, no. 4, 22-26, ISSN 1680-0338, 1998.
- LÓPEZ, T.; RUIZ, M. E.; CID, G.; GONZÁLEZ, F.: "Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del Sur de La Habana: Constitución metodológica en la determinación de los balances hídricos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 12(2): 49-53, ISSN-1010-2760, RNPS-0111, 2003.
- LÓPEZ-CRUZ, I.; RAMÍREZ-ARIAS, A.; Y ROJANO-AGUILAR, A.: "Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos", *Rev. Chapingo Serie Hortic.* 11(2): 257-267, 1027-152X, 2005.
- NAMUCO, O.; O'TOOLE, J.: "Reproductive stage waterstress and sterility. I. Effect of stress during meios", *Crop Science* 26: 317-321, ISSN 0011-183X, 1986.
- OTEGUI, M.; ANDRADE, F.; SUERO, E.: "Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking", *Field Crops Res.*, 40: 87-94, ISSN 0378-4290, 1995.
- RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T. Y FERERES, E.: *AquaCrop – Reference Manual*. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/aqua-crop.html>, 2011.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. AND FERERES, E.: "AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description", *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447, ISSN: 0002-1962, 2009.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. Y FERERES, E.: "On the conservative behaviour of biomass water productivity" *Irrigation Science*, 25:189-207, ISSN: 0342-7188, 2007.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E.; RAES, D.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, ISBN 978-92-5-308564-4, Rome. 510pp, 2012.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.; RAES, D. Y FERERES, E.: AquaCrop—the FAO crop model to simulated yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101 (3):426-437, ISSN: 0002-1962, 2009.
- WANI, S.; ALBRIZIO, R.; VAJJA, N.: *Sorghum*. In: Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres E, Raes D (eds) *Crop yield response to water*. FAO, *Irrigation and Drainage* 66. pp 144–151, ISBN 978-92-5-308564-4, 2012.

Recibido: 15/06/2017.

Aprobado: 18/12/2017.

Felicita González-Robaina, Investigadora Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana. Cuba, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Rosabel Delgado-Acosta, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Yunier Díaz-Pérez, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

Julián Herrera-Puebla, Correo electrónico: direccioninvest1@iagric.cu

Teresa López-Seijas, Correo electrónico: directoradjunta@iagric.cu

Greco Cid-Lazo Correo electrónico: dptoambientel@iagric.cu