

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Validación del modelo *AquaCrop* en maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum vulgare* L. Monech)

Validation of the AquaCrop Model in Corn (Zea mays L.) and Sorghum (Sorghum vulgare L. Monech)

Ing. Yunier Díaz-Pérez, Ing. Miguel. A. Villalobos-Pérez, Dr.C. Felicita González-Robaina, Dr.C. Julián Herrera-Puebla
Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. El modelo *AquaCrop* es creado por FAO con el fin de esclarecer aún más los procesos que subyacen a la relación entre el rendimiento de los cultivos en respuesta al uso y el déficit del agua. Simula el crecimiento, la productividad y el uso de agua de un cultivo día a día, según se vea afectado por condiciones cambiantes en la disponibilidad de agua y las condiciones ambientales. En Cuba se reportan muy pocos trabajos publicados de *AquaCrop*. En atención a lo anterior se desarrolló la presente investigación con el objetivo de calibrar y validar el modelo *AquaCrop* de FAO, para los cultivos maíz y sorgo en suelo Ferralítico Rojo compactado para las condiciones climáticas en la región de Alquizar. Los datos para la calibración y validación se obtuvieron de experimentos de campo llevados a cabo en la Estación Experimental del IAgric, Alquizar. Entre los principales resultados se obtuvo los parámetros conservativos modificados en el modelo luego del proceso de ajuste en la calibración. El rendimiento potencial alcanzado en la calibración del modelo fue de 8,27 y 4,73 t ha⁻¹ para maíz y sorgo respectivamente, ambos valores están dentro del intervalo de los obtenidos en los experimentos de campo. La simulación potencial de biomasa, cobertura vegetal y rendimiento obtuvieron valores de eficiencia de simulación superiores a 0,8, errores cuadráticos medios menores al 10% y coeficientes de determinación por encima de 0,9, lo que demuestra que el modelo *AquaCrop* explica adecuadamente el desarrollo del crecimiento de los cultivos maíz y sorgo.

Palabras clave: simulación, rendimiento, producción de biomasa, cobertura del dosel.

ABSTRACT. The AquaCrop model is created by FAO in order to further clarify the processes that underlies the relationship between crop yields in response to water use and deficit. It simulates a crop's growth, productivity and water use day by day, as it is affected by changing conditions in water availability and environmental conditions. In Cuba, very few published works of AquaCrop are reported. In view of the above, the present investigation was developed with the objective of calibrating and validating the FAO AquaCrop model for corn and sorghum crops in compacted Red Ferralitic soil for climatic conditions in Alquizar region. The data for the calibration and validation were obtained from field experiments carried out at IAgric Experimental Station, Alquizar. Among the main results, the conservative parameters modified in the model were obtained after the adjustment process in the calibration. The potential yield reached in the calibration of the model was 8.27 and 4.73 t ha⁻¹ for corn and sorghum, respectively; both values are within the range of those obtained in the field experiments. The potential simulation of biomass, vegetation cover and yield obtained simulation efficiency values higher than 0.8, mean squared errors less than 10% and coefficients of determination above 0.9, which shows that the AquaCrop model adequately explains the growth development of corn and sorghum crops.

Keywords: simulation, grain yield, biomass production, canopy cover.

INTRODUCCIÓN

La respuesta de los cultivos al déficit hídrico es compleja y es común el uso de funciones empíricas para estimar los rendimientos. Estas funciones casi siempre están relacionadas con el nivel de déficit hídrico que sufre el cultivo durante una

parte o todo el ciclo del mismo (Flores *et al.*, 2013). Uno de los métodos más usados es la ecuación que indica la relación entre la pérdida relativa de rendimiento de cualquier cultivo (sea de una especie herbácea o leñosa) y la reducción relativa

del consumo de agua (evapotranspiración), por medio de un coeficiente (ky), desarrollado por Doorenbos y Kassam (1986). Otra alternativa son los modelos de simulación biofísica que manejan relaciones para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo teniendo en cuenta las características genéticas, agronómicas y condiciones ambientales durante el desarrollo de los mismos (Monteith, 1996). Según López-Cruz *et al.* (2005) 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.

AquaCrop es un modelo desarrollado por la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos herbáceos como una función del consumo de agua bajo condiciones de secano o riego suplementario o total (Steduto *et al.*, 2009). Sus aplicaciones son posibles para un amplio rango de condiciones ecológicas y sistemas productivos. Según Raes *et al.* (2011), es un modelo de desarrollo de follaje, enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible. Este modelo determinístico está orientado a usuarios con conocimientos computacionales limitados, es simple sin perder exactitud porque usa un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes *et al.*, 2009).

A pesar de las bondades expuestas anteriormente para el modelo *AquaCrop*, en Cuba se han realizado muy pocos trabajos donde se aplique este modelo, resaltando lo publicado por Tornés (2016)¹, quien se auxilió de *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 provincia de Granma. Este vacío en la investigación sobre el potencial de usos de este modelo en las condiciones de clima de Cuba, indica la necesidad de trabajos para la calibración local con datos experimentales según han señalado Hussein *et al.* (2011).

El presente trabajo tuvo como objetivo calibrar y validar el modelo *AquaCrop* de FAO, para los cultivos maíz y sorgo en suelo Ferralítico Rojo compactado para las condiciones climáticas de la región de Alquizar.

MÉTODOS

El modelo se calibró con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (diciembre-abril) en el período 1982-1983 para el cultivo del maíz y (diciembre-abril) en los años 1986-1987 para el cultivo del sorgo, en la Estación Experimental del antes Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, actualmente Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, ubicada en el municipio de Alquizar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' W, altura sobre el nivel medio del mar 6 m, 12 km de la costa. Para ambos experimentos se utilizó el método de riego por surcos.

La variedad de maíz utilizada en el experimento fue T-66, la fecha de siembra 16 de diciembre del 1982 con temperaturas umbrales de 10 a 30 °C, alcanzó su madurez a los 125 días después de la siembra, con una densidad de población de 48 000 plantas ha⁻¹ y un rendimiento 5-7 t ha⁻¹. Para el cultivo del sorgo se usó la variedad enana, la fecha de siembra fue el 13 de diciembre del 1986, con temperaturas umbrales 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. Los procedimientos experimentales para la estimación de los consumos de agua de los cultivos maíz y sorgo fueron descritos por Giralt *et al.* (1990)² y Herrera *et al.* (2016) para maíz y sorgo respectivamente.

El modelo *AquaCrop* ha sido descrito ampliamente por Raes *et al.* (2009) el cual consta de varias ecuaciones con las que, utilizando 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. La siguiente ecuación (1) es fundamental para el motor de crecimiento de *AquaCrop* la cual evolucionó a partir del enfoque del estudio *FAO: Riego y Drenaje* N° 33 (Doorenbos y Kassam, 1986), al separar la evaporación del suelo no productiva (E) de la transpiración del cultivo productiva (Tr) y al estimar la producción de biomasa directamente a partir de la transpiración del cultivo real mediante un parámetro de productividad (Figura 1).

$$B = WP \sum T_r \quad (1)$$

donde:

B - biomasa acumulada producida (kg m⁻²);

T_r - transpiración del cultivo (ya sea mm o m³ por unidad de superficie), con la suma respecto al tiempo en el que se produce la biomasa;

WP - parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m³ de agua transpirada).

En la mayoría de los cultivos, solo una parte de la biomasa producida se destina a los órganos cosechables para producir rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como índice de cosecha (HI), por tanto, los procesos subyacentes que culminan en B y HI se diferencian claramente entre sí. En consecuencia, la separación de Y en B y HI permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y HI por separado.

La producción de biomasa y de grano depende de los parámetros del cultivo, como conductancia estomatal, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha. La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo (Y) es la ecuación (2):

$$Y = B \cdot Hi \quad (2)$$

donde:

B - biomasa del cultivo;

Hi - índice de cosecha que depende de la variedad o híbrido del cultivo.

¹ TORNÉS, O.: Parámetros de diseño y manejo del riego por surcos en el cultivo del frijol (*Phaseolus Vulgaris* L.) en suelos fluvisoles, 145 pp., Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2016.

² GIRALT, E.: Régimen de riego del cultivo del maíz (*Zea mays* L.), 24pp., Informe Final Proyecto, La Habana, Cuba, 1990.

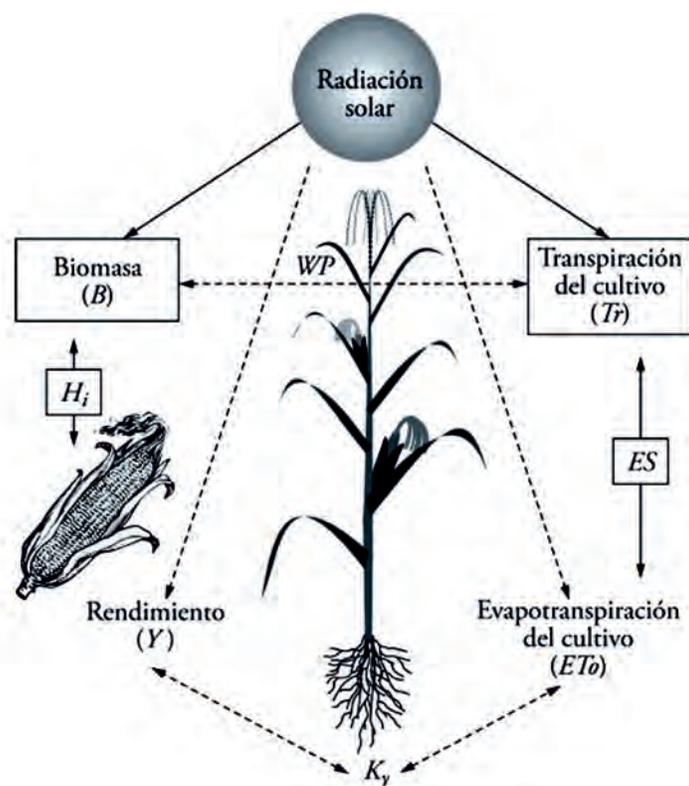


FIGURA 1. Operación y lógica en la simulación con el modelo *AquaCrop*, tomado de Flores-Gallardo *et al.* (2013).

Para el cálculo de la productividad agronómica del agua (WP) el numerador se expresó en términos de biomasa y de rendimiento del cultivo (kg), mientras que en el denominador se usó la evapotranspiración (ET, m³), ambos referidos a una hectárea, según muestran las siguientes ecuaciones:

$$WP_B = \frac{B}{ET} \quad (3)$$

$$WP_Y = \frac{R}{ET} \quad (4)$$

donde:

WP_B- productividad agronómica del agua para biomasa;

WP_Y- productividad agronómica del agua para rendimiento.

A falta de datos de campo de la cobertura del follaje, la misma fue determinada a partir de la relación empírica entre índice de área foliar y cobertura propuesta para sorgo por Araya *et al.* (2016) y para maíz por Flores *et al.* (2013), respectivamente:

$$CC=1-\exp(-0,416 LAI) \text{ y } CC=1,005 \times [1-\exp(-0,6 LAI)]^{1,2} \quad (5)$$

Los datos climáticos para la caracterización del área de estudio, fueron tomados de la estación meteorológica localizada en el área experimental., situada dentro del perímetro representativo para el área de estudio, según lo planteado por Allen *et al.* (2006).

Para el cultivo del maíz en la época (diciembre-abril) de los años 1982-1983 las variables climáticas se comportaron de la siguiente manera: la temperatura media mínima y máxima variaron entre los 18,83 y 28°C respectivamente, la lluvia total para los meses en estudio fue de 529 mm. El mayor valor de precipitación caída correspondió al mes de febrero con un total de 71 mm, siendo este el mes de mayor promedio de lluvia caída con un valor de 5,4 mm, mientras que el mes de menor

promedio fue diciembre con una media de 0,2 mm mensual. La Evapotranspiración de referencia (ET₀) tuvo un valor total para los meses en estudio de 638,7 mm. El promedio mensual es de 4,24 mm y los máximos y mínimos corresponden a el mes de abril (6,94 mm) y enero (2,48 mm), respectivamente.

En el caso del sorgo las variables climáticas en la época (diciembre-abril) de los años 1986-1987 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 210,7mm. 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 11 mm. La Evapotranspiración de referencia (ET₀) 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.

El balance hídrico realizado para el maíz y el sorgo son negativos con 11 decenas (73,33%) de un total de 15 existentes y 9 decenas (75%) de un total de 12 existentes en los periodos de estudio para ambos casos respectivamente, por lo que el riego

es imprescindible para la obtención de buenos rendimientos agrícolas.

El tipo de suelo donde se realizaron los experimentos 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) y se resumen en la Tabla 1 y conforman el fichero de suelo que se utilizó para todas las corridas del modelo.

TABLA 1. Análisis granulométrico y otras propiedades y parámetros físicos e hidrofísicos del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado, tomado de Cid *et al.* (2011)

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 θ_{FC} densidad volumétrica o aparente del suelo en determinada; 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_{satur} contenido de agua en el suelo a la saturación; K_{sat} conductividad hidráulica del suelo saturado; Pt porosidad total del suelo; $V_{inf.bas}$ velocidad de infiltración básica en el suelo.

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.

Condiciones iniciales para ambos casos

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 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.

La ventana principal del modelo *AquaCrop* (versión 3.1), presenta un grupo de módulos que permiten ingresar las variables externas, las variables de estado, los parámetros conservativos y los parámetros especificados por el usuario. Se considera parámetro conservativo, en el sentido de que los parámetros deben permanecer prácticamente constantes bajo diferentes condiciones de crecimiento y regímenes hídricos. Los parámetros específicos por el usuario dependen de la ubicación, la variedad del cultivo y las prácticas de manejo, los cuales deben ser especificados.

Teniendo en cuenta lo antes planteado, para el ajuste del modelo se realizaron simulaciones, inicialmente sin modificar los parámetros conservativos de los cultivos maíz y sorgo propuestos por Hsiao *et al.* (2009) y Araya *et al.* (2016), y se compararon las salidas en cuanto a rendimiento respecto a la información de campo. A su vez se evaluó estadísticamente las

variables agronómicas, biomasa seca, rendimiento del grano e índice de cosecha durante el ciclo del cultivo. Si el ajuste obtenido no es el adecuado se procede a cambiar algún/algunos parámetros conservativos y se vuelve a iniciar el proceso descrito.

Análisis para la validación

La calibración es un ajuste fino de ciertos parámetros del modelo para obtener correlación alta entre los valores experimentales y los simulados (Hussein *et al.*, 2011). Después de realizar la calibración del modelo *AquaCrop*, la validación se hizo mediante análisis estadísticos de los datos de biomasa, rendimiento y cobertura del dosel, reales y los simulados con los parámetros de entrada.

La bondad del ajuste se valoró a través del 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), y se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \tag{6}$$

$$EF = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{7}$$

$$d = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \tag{8}$$

donde:

S_i y O_i - valores simulados y observados, n es el número de observaciones;

O - media de los valores de O_i .

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

Calibración del modelo AquaCrop

En la Tabla 2 se muestran los parámetros conservativos modificados después del proceso de ajuste para la calibración.

La cobertura del dosel vegetal al 90% de emergencia fue de 0,24 y 0,75%, el coeficiente de decline del dosel por día fue estimado como 8 y 12,8%, valores que no difieren de los propuestos

por Hsiao *et al.* (2009) y Araya *et al.* (2016) para maíz y sorgo, respectivamente. Aquellos parámetros relacionados con la duración de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo sufrieron variaciones con respecto a los usados como valores de partida para comenzar la calibración; de este modo la cantidad de días después de plantado el cultivo para lograr la máxima cobertura, el comienzo de la floración y la senescencia fue de 64 y 63; 54 y 68; 106 y 109 días, para el maíz y sorgo respectivamente.

El índice de cosecha (HI) considerado para maíz fue de 0,40 y para sorgo de 0,43, siendo estos los valores más comunes obtenidos bajo condiciones óptimas de desarrollo durante la calibración del modelo. Estos valores se encuentran dentro del rango propuesto por Wani *et al.* (2012) que es de (0,3 y 0,5).

El modelo tiene predeterminado el valor de la productividad del agua normalizada para maíz y sorgo de 33,7 g m⁻² (Raes *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009). Para mejorar las predicciones del modelo fue necesario reducir este valor a 32 y 30 g m⁻² para el maíz y sorgo, respectivamente.

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

TABLA 2. Parámetros utilizados en la calibración del modelo AquaCrop para la simulación del crecimiento de los cultivos maíz y sorgo para suelo Ferralítico Rojo, Artemisa, Cuba

Parámetro	Valor usado para maíz	Valor usado para sorgo
Densidad de plantación (plantas ha ⁻¹)	48000	150000
Cobertura inicial del dosel	0,24	0,75
Expansión del dosel (% día ⁻¹)	14,6	13,6
Declive del dosel (% día ⁻¹)	8	12,8
Emergencia (días después de plantación)	7 días	10
Máxima cobertura del dosel (días después de plantación)	64 días	63 días
Inicio de la senescencia (días después de plantación)	106 días	109
Longitud de florescencia (días después de plantación)	54 días	68
Madurez (días después de plantación)	124 días	118
Máxima profundidad efectiva radicular (m)	0,40 m	0,40
Máxima profundidad radicular (días después de plantación)	64 días	99
Máxima evapotranspiración del cultivo (mm día ⁻¹)	1,2	1,15
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	32	30
Índice de cosecha (HI) (%)	40	43
Función de expansión del dosel	Moderadamente sensible	Tolerante al estrés de agua
P-upper	0,20	0,20
P-lower	0,55	0,55
Forma	3,0	3,0
Función del cierre de los estomas	Moderadamente sensible	Moderadamente tolerante
P-upper	0,5	0,5
Forma	3,0	3,0
Función de la senescencia temprana del dosel	Moderadamente tolerante	Moderadamente tolerante
P-upper	0,65	0,65
Forma	3,0	3,0
Efectos de la fertilidad	No considerado	Considerado un 10%
Efectos de la temperatura	No considerado	No considerado
Curva número	71	71
Rapidez de la evaporación del agua (capa de superficie de tierra evaporándose: 0,04 m)	9	10
Capa impermeable de suelo (m)	0,4	0,4

Los parámetros calibrados del modelo AquaCrop fueron los de entrada del experimento de Giralt *et al.* (1990) y Herrera *et al.* (2016) cuando se regó al 85% de la capacidad de campo para ambos casos durante todo el ciclo del cultivo (densidad de población, productividad del agua, índice de cosecha, expansión inicial del dosel vegetal, cierre de los estomas, senescencia, entre otros).

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 maíz y 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 para el cultivo del maíz este varió entre 3,9 y 8,3 t ha⁻¹ y para el cultivo del sorgo ente 3,5 y 5 t ha⁻¹.

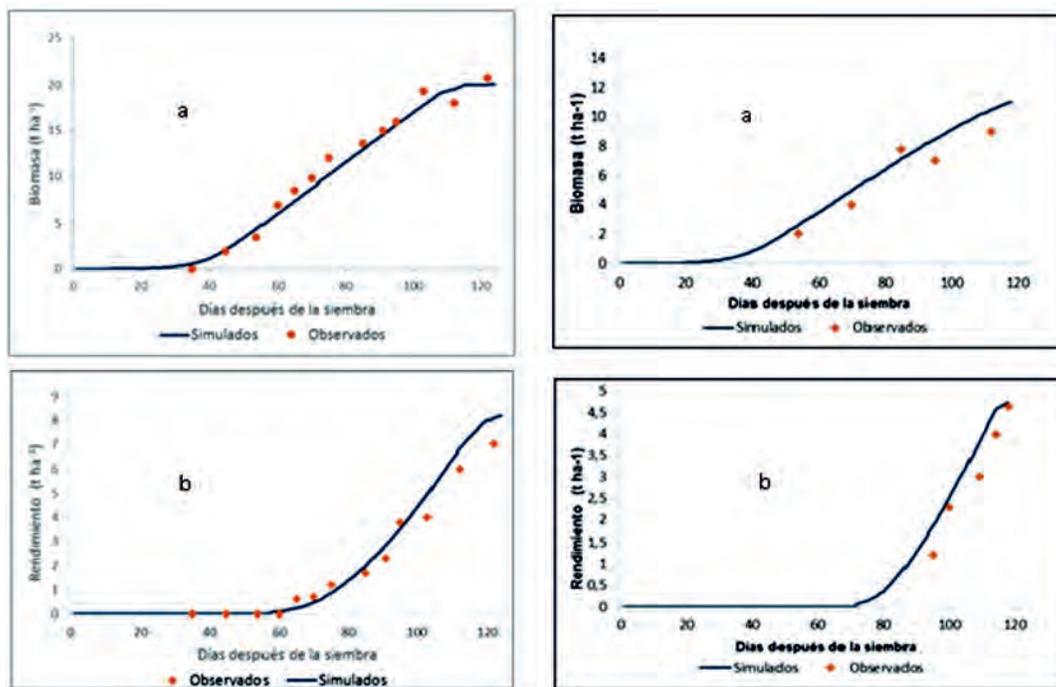
TABLA 3. Resultados de la simulación de la producción potencial del maíz

Cultivo	Producción (t ha ⁻¹)		Parámetros de balance de agua en el suelo (mm)		Productividad del agua (kg m ⁻³)	
Maíz	Biomasa	20,68	Evaporación total	124	Biomasa	4,97
			Transpiración	292,9		
	Rendimiento	8,27	Escorrentía	100,30	Rendimiento	1,99
			Infiltración	627,4		
Sorgo	Biomasa	11,0	Evaporación total	103,6	Biomasa	4,88
			Transpiración	121,8		
	Rendimiento	4,73	Escorrentía	0	Rendimiento	2,10
			Infiltración	437,7		
			Drenaje	177,7		

La productividad en base al rendimiento para el cultivo del maíz estuvo en el rango de los obtenidos en los experimentos de campo (0,93 y 2,53 kg m⁻³), mientras que para el cultivo del sorgo fue superior al rango obtenido en experimentos de campo (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 (2002)³ la sobrestimación de la ET con el uso del balance simplificado puede alcanzar valores que están entre 15% y 55% y la predicción de la

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

La Figura 2 presenta el seguimiento de la biomasa, rendimiento agronómico y cobertura vegetal (CC), medido y simulado con el modelo AquaCrop, para la variedad T-66 del cultivo del maíz parte izquierda y para la variedad enana del cultivo del sorgo parte derecha, bajo las condiciones ambientales de Alquizar, en la siembra de diciembre 1982 - abril 1983 y diciembre 1986 - abril 1987, respectivamente; sin límites de agua y usando un nivel de fertilidad del suelo en el modelo de 90%. Se observa que los valores simulados presentan concordancia en relación con los datos medidos en campo.



³ LÓPEZ, T.: Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del Sur de La Habana: Constitución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los balances hídricos, 105pp., Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas, Instituto de Investigaciones Fundamentales de la Agricultura Tropical (INIFAT), La Habana, Cuba, 2002.

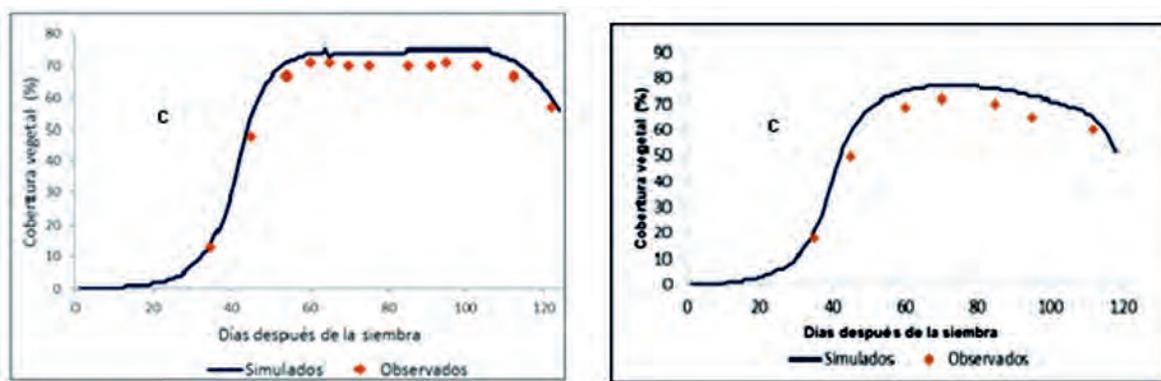


FIGURA 2. Seguimiento del comportamiento de variables medidas en campo y simuladas con AquaCrop en maíz variedad T-66 (a la izquierda) y sorgo variedad enana (a la derecha), bajo las condiciones de Alquízar, a: biomasa seca, b: rendimiento del grano seco, c: cobertura vegetal.

Validación del modelo AquaCrop

Adicionalmente, el seguimiento de la biomasa simulada con el modelo y medida en campo muestra valores para maíz de 20,8 t ha⁻¹ y de 20,6 t ha⁻¹ y para sorgo de 10,5 t ha⁻¹ y de 9,8 t ha⁻¹, presentando una diferencia de 0,2 t ha⁻¹ y 0,67 t ha⁻¹ lo que representa en términos porcentuales menos del 1 y del 6%, respectivamente. Los resultados indican que las predicciones de la biomasa del modelo fueron buenas para maíz ($RMSE=1,05$ t ha⁻¹, $EF=0,97$ y $d=0,99$) y para sorgo ($RMSE=1,09$ t ha⁻¹, $EF=0,88$ y $d=0,96$).

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

TABLA 4. Estadígrafos seleccionados para analizar la precisión del modelo

Estadígrafo	Variables de salida para maíz			Variables de salida para sorgo		
	Biomasa	Rendimiento	Cobertura	Biomasa	Rendimiento	Cobertura
RMSE	1,05	0,45	4,2	1,09	0,5	6,28
EF	0,97	0,79	0,99	0,88	0,80	0,87
<i>d</i>	0,99	0,99	0,98	0,96	0,95	0,97
<i>r</i>	0,98	0,99	0,99	0,96	0,97	0,99
pendiente	0,96	1,09	1,06	0,89	1,18	0,91
R ²	0,97	0,98	0,99	0,91	0,93	0,98

En ambos casos la raíz cuadrada del cuadrado medio del error 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 para maíz de 0,96; 0,97 y 0,99, y para sorgo de 0,96, 0,97 y 0,99, 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 observa la relación lineal entre los valores observados y simulados de rendimiento, con coeficientes de determinación de 0,98 para maíz y 0,93 para sorgo. La pendiente en ambos casos estuvo 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 los cultivos maíz y sorgo, evaluados bajo las condiciones edafoclimáticas de Alquízar. Coincidiendo con las propuestas de Hsiao *et al.* (2009) y Araya *et al.* (2016) de que el modelo puede ser usado para simular el rendimiento y la biomasa de los cultivos maíz y sorgo.

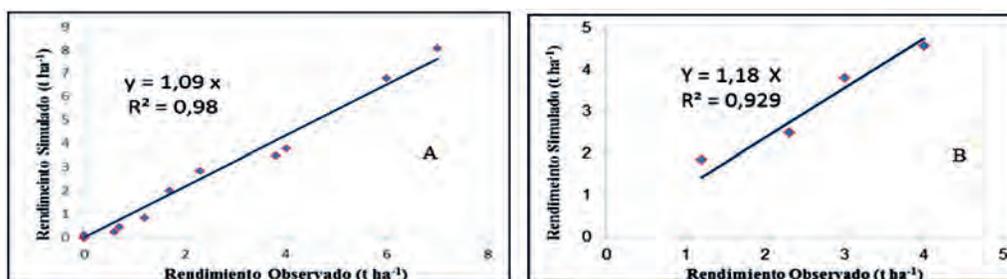


FIGURA 4. Relación entre rendimiento observado y simulado para: A- maíz, B- sorgo.

CONCLUSIONES

- El rendimiento potencial alcanzado en el proceso de simulación para la calibración del modelo fue de 8,27 t ha⁻¹ para maíz y 4,73 t ha⁻¹ para sorgo, ambos están dentro del intervalo de los resultados obtenidos en los experimentos de campo 3,9 a 8,3 t ha⁻¹ y 3,5 a 5 t ha⁻¹ maíz y sorgo respectivamente.

- La precisión obtenida en la simulación potencial de biomasa, 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 los cultivos maíz y sorgo, evaluados bajo las condiciones edafoclimáticas de Alquízar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M.: *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, edit. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, Ed. FAO, Roma, 2006. ISBN-92-5-304219-2.
- ARAYA, A.; KISEKKA, I.; HOLMAN, J.: *Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop*, 17pp., *Irrig Sci*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. DOI 10.1007/s00271-016-0515-7.
- 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* 20(2): 42-46, 2011., ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.: *Yield response to water*, 193pp., Irrigation and Drainage, Paper 33, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1986. ISBN 92-5-300744-3.
- FLORES-GALLARDO, H., OJEDA-BUSTAMANTE, W.; FLORES-MAGDALENO, H.; SIFUENTES-IBARRA, E.; MEJIA-SAENZ, E.: “Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop”, *Agrociencia*, 47 (4): 347-359, 2013. ISSN 1405-3195.
- GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; LÓPEZ, T.; CID, G.: “Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4) (octubre-noviembre-diciembre): 21-27, 2014. ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054,
- 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.* 101(3): 488-498, 2009. ISSN 0002-1962.
- 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*, 6(3): 3-10 (julio-agosto-septiembre), 2016. ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.
- HSIAO, T.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D. & FERERES, E.: “AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize”, *Agronomy Journal*, 101(3): 448-459, 2009. ISSN 0002-1962.
- HUSSEIN, F.; JANAT, M. AND YAKOUB, A.: “Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model”, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4): 1319-1330, 2011. ISSN: 1695-971X.
- 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, 1998. ISSN 1680-0338.
- 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 Hortíc.*, 11(2): 257-267, 2005. ISSN: 1027-152X.
- MONTEITH, J. L.: “The quest for balance in crop modeling”, *Agronomy Journal*, 88(5): 695-697, 1996. ISSN: 0002-1962.
- RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T. & FERERES, E.: *AquaCrop – Reference Manual*. FAO, Rome, Italy. 218 p, [en línea] 2011, Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> [Consulta: septiembre 22 2017].
- 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, 2009. ISSN: 0002-1962.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E.; RAES, D.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, 510pp, Estudio FAO, Riego y Drenaje 66, Rome, 2012. ISBN 978-92-5-308564-4.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.; RAES, D. & FERERES, E.: “AquaCrop—the FAO crop model to simulated yield response to water: I. Concepts and underlying principles”, *Agronomy Journal*, 101 (3):426-437, 2009. ISSN: 0002-1962.
- WANI, S.; ALBRIZIO, R.; VAJJA, N.: Sorghum. In: Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres E, Raes D.: (eds) Crop yield response to water, pp. 144–151, FAO, *Irrigation and Drainage* 66. Rome, 2012. ISBN 978-92-5-308564-4.
- WILLMOTT, C.: “Some comments on the evaluation of model performance”, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 63(11): 1309-1313, 1982.

Recibido: 23/10/2017.

Aprobado: 28/02/2018.

Yunier Díaz Pérez, Adiestrado, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba. Correo electrónico: dptoambiente7@iagric.cu

Miguel. A. Villalobos-Pérez, Correo electrónico: dptoambiente7@iagric.cu

Felicita González-Robaina, Correo electrónico: dptoambiente4@iagric.cu

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

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.