



Evaluation of *AquaCrop* model in crop dry bean growth simulation

Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol

M.Sc. Norge Tornés Olivera¹, Dr.C. Oscar Brown Manrique^{II}, M.Sc. Yarisbel Gómez Masjuan¹,
Ing. Arnaldo Manuel Guerrero Alega¹

¹ Universidad de Granma (UDG), Departamento de Producción Agrícola, Bayamo. Granma, Cuba.

^{II} Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez” (UNICA), Ciego de Ávila, Cuba.

ABSTRACT. The research was carried out from November, 2013 to March, 2014. The purpose of this investigation was to evaluate the AquaCrop model simulation of canopy cover, dry biomass and soil water balance in dry bean crop. The area of research belonging to UBPC Grito de Yara, belonging to Yara county of Granma province. The investigation area was a plot, with nine furrows with 0.8 m width and 100 m length. The plot was divided into 3 subplots with 33 m of length, central furrow of each subplot were utilized for measurement. Variety Delicias 360 was sown on December 20, 2013, with 0,5 m of plant spacing and 0,8 m of row spacing. Canopy cover (CF), dry biomass (BSA) and soil water content (CHS) evolution simulated by AquaCrop model were similar in tendency and absolute values to that observed. Considering R² (0,81; 0,95; 0,99), RMSE (13,4; 0,45; 7,3), NRMSE (19,3; 17,0; 7), EF(0,8; 0,94; 0,63) y d (0,95; 0,98; 0,92) indicators as statistical criteria for CF, BSA y CHS variables, respectively, it was possible to prove that AquaCrop model can adequately simulate the variables observed.

Keywords: statistical indicators, biomass, canopy cover.

RESUMEN. La investigación se desarrolló entre los meses de noviembre de 2013 a marzo de 2014, con objetivo de evaluar del modelo AquaCrop en la simulación de la cobertura foliar (CF), la biomasa seca aérea (BSA) y el balance de humedad del suelo (CHS) en el cultivo del cultivo del frijol. El área de la investigación pertenece a la UBPC Grito de Yara, perteneciente al municipio Yara de la provincia Granma. El área de investigación fue una parcela conformada por un total de 9 surcos de 100 m de largo y un ancho de 0,8 m. Se sembró la variedad Delicias 360, el día 20 de diciembre con un marco de plantación de 0,5x0,8 m. La evolución de las variables (CF), (BSA) y (CHS) simuladas por AquaCrop fueron similares tanto en tendencias como en valores absolutos a los observados. Tomando como criterio los indicadores estadísticos: (R²) con valores de 0,81; 0,95; 0,99; (RMSE) con valores de 3,4; 0,45; 7,3; (NRMSE) con valores de 19,3; 17,0; 7,0; (EF) con valores de 0,80; 0,94; 0,63 (d) con valores de 0,95; 0,98; 0,92, para las variables CF, BSA y CHS respectivamente, se pudo comprobar que el modelo es capaz de reproducir las variables observadas de forma confiable.

Palabras clave: indicadores estadísticos, biomasa, cobertura foliar.

INTRODUCTION

Dry bean, like other crops that commercialize, presents a high vulnerability to the selling price, because of the constant changes in the agricultural market. Provided the problems dry bean production presents in Cuba (climatic variability, pest and disease incidence and water irrigation usage, among others), some tool, supporting the decision making to achieve the lower economic and environmental costs should be available. The use of this kind of tool, such as crops simulation model, is justified when the objective is the resources optimization, among them

INTRODUCCIÓN

El frijol al igual que otros cultivos que se comercializan presenta una alta vulnerabilidad en los precios de venta ante los constantes cambios en el mercado. Ante los problemas que se presentan en Cuba, con la producción de frijol (variabilidad climática, incidencia de plagas y enfermedades, uso del agua de riego, entre otros) es necesario que este pueda disponer de herramientas que le sirvan de ayuda a la toma de decisiones para lograr el menor costo económico y ambiental. El uso de este tipo de herramientas, como son los modelos de simulación de cultivos, está justificado cuando

water irrigation, with the purpose of reaching the largest profits.

The relationship between water consumption and yield or total biomass production, can be calculated empirically with the object of obtaining the production functions of water consumption (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005; Toumi *et al.*, 2016), through which yield or total biomass can be related with some measurement of crop water consumption. The problem associated with crop production functions is that these have been utilized independently of specific locality and other limitations (Doorenbos & Kassam, 1979).

An alternative to the empirical production functions is the use of crop simulation models for irrigation management (Steduto *et al.*, 2009; Amiri *et al.*, 2014). Crop simulation models are useful tools to estimate crop yield, taking into account several combinations of crop input, environmental factors and management practices (Masanganise *et al.*, 2012).

AquaCrop can be found among the existent models (Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). It is a model of crop general application, which has been utilized in several parts of the world (Stricevic *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2015; Trombetta *et al.*, 2016), under different environmental conditions; however, in the international literature few investigations with dry bean crop are reported. The aim of this investigation is to evaluate AquaCrop model simulation of canopy cover, dry biomass and soil water balance in dry bean crop cultivated with furrow irrigation method.

METHODS

The research was carried out from December, 2013 to March, 2014. The area of research belongs to the UBPC Grito de Yara, which is located at latitude 20° 25' north and at longitude 76° 53' west with an altitude of 6 m.s.n.m. The investigation area was a plot, with nine furrows with 0.8 m width and 100 m length. The plot was divided into 3 subplots with 33 m of length and the central furrow of each subplot was utilized for measurement. The inflow rate was 2 L s⁻¹. Inflow rate delivery was ensured by means of PVC spigots calibrated for 50 mm of diameter. A total of 7 irrigation events were applied. Variety Delicia 360 was sown on December 20th, 2013, with 0,5 m of plant spacing and 0,8 m of row spacing. Measurements were recorded on 10 day time steps. Evaluated variables were: canopy cover (CF), by means of upright photograph technic and image processing (Steduto *et al.*, 2009); dry biomass (BSA), by means of gravimetric method; and soil water content (CHS) by means of gravimetric method.

According to Raes *et al.* (2009), AquaCrop model consists of several equations that with climatic date, plant density, genetic characteristics, soil type, fertilization level and irrigation deficit level, simulate crop growth and yield. This model requires the following meteorological information daily, 10-daily or monthly data: minimum and maximum air temperature (Tmin, Tmax), reference evapotranspiration (ETo), rainfall (Pp). AquaCrop considers medium atmospheric CO₂ concentration for the year 2000 measured at Mauna Loa Observatory, in Hawaii of 369, 47 parts per million by

lo que se busca es la optimización de los recursos, entre ellos el agua de riego con el fin de conseguir el mayor margen de beneficio.

La relación entre el agua utilizada y el rendimiento o la producción total de biomasa, puede ser determinada empíricamente con el objeto de obtener las funciones de producción de consumo de agua (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005; Toumi *et al.*, 2016), mediante las cuales el rendimiento o la biomasa total se relaciona con alguna medida del uso del agua por parte del cultivo. El problema que viene asociado con las funciones de producción de cultivos es que estas se han usado muchas veces con independencia de la localización específica, además de otras limitaciones (Doorenbos y Kassam, 1979).

Una alternativa a las funciones de producción empíricas es el uso de los modelos de simulación de cultivos para el manejo del riego (Steduto *et al.*, 2009; Amiri *et al.*, 2014). Los modelos de simulación del crecimiento son herramientas valiosas para estimar el rendimiento del cultivo, considerando varias combinaciones de entrada del cultivo, factores ambientales y prácticas de manejo (Masanganise *et al.*, 2012).

Entre los modelos existentes se encuentra AquaCrop (Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009) que es un modelo de aplicación general de cultivo, el cual se ha utilizado en varias zonas del mundo (Stricevic *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2015; Trombetta *et al.*, 2016) bajo diferentes condiciones ambientales; sin embargo, en la literatura internacional se reportan pocos trabajos de evaluación del modelo para el cultivo del frijol. El trabajo tiene como objetivo evaluar el modelo AquaCrop en la simulación de cobertura foliar, biomasa seca aérea y balance de humedad del suelo en el cultivo del frijol utilizando el método de riego por surcos.

MÉTODOS

La investigación se desarrolló entre los meses de noviembre de 2013 a marzo de 2014. El área de la investigación pertenece a la UBPC Grito de Yara, la cual se encuentra ubicada a los 20° 25' de Latitud N y a los 76° 53' de Longitud O con una altura de 6 m.s.n.m. El área de investigación fue una parcela conformada por un total de 9 surcos de 100 m de largo y un ancho de 0,8 m. Se dividió la parcela en tres subparcelas de 33 m de longitud, se utilizaron los surcos centrales de cada subparcela para las mediciones. El caudal utilizado fue de 2 L s⁻¹. La entrega del caudal se garantizó con la utilización de espigas de PVC calibradas para el diámetro 50 mm.

Se realizaron un total de 7 riegos. Se sembró la variedad Delicia 360, el día 20 de diciembre con un marco de plantación de 0,5x0,8 m. Las mediciones se realizaron de forma decenal. Las variables evaluadas fueron: cobertura foliar (CF) mediante técnicas de fotos verticales y procesamiento de imágenes (Steduto *et al.*, 2009); contenido humedad del suelo (CHS) por gravimetría y biomasa seca aérea (BSA) por gravimetría.

De acuerdo con Raes *et al.* (2009), 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. Este modelo requiere la siguiente información meteorológica diaria, decenal o mensual: temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), precipitación (Pp) y evapotranspiración

volume, as the reference. The values of this concentration can be substituted by present emissions (Raes *et al.*, 2009).

The climatic data for this investigation were measured at Agrometeorological Station of Veguitas which is located at a distance of 3 km from the study area. Reference evapotranspiration was estimated using the "ETo Calculador ver.3.2" software and then it was exported to AquaCrop model. Biomass and grain productions depend on crop parameters, such as stomata conductance, canopy senescence, water productivity and harvest index.

AquaCrop model estimates crop water requirement by means of soil water balance with equation 1:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j-1} + D + (R + P) + ES + Tr \quad (1)$$

where: θ is the dependent variable (mm); I is the depth to irrigate (starting point of calculation); j is the updated moisture content at the time of next irrigation; D is the drainage by deep percolation (mm); $R+P$ are irrigation plus precipitation (mm); ES is soil evaporation (mm) and Tr is the transpiration of the crop (mm); $R+P$ are irrigation plus precipitation (mm); ES is soil evaporation (mm), Tr is the transpiration of the crop (mm).

AquaCrop daily provides the moisture content in the soil in its different layers in which the profile is divided at intervals of 0,10 m to the depth of the soil that is described as input parameter to the model. The comparison between observed and simulated moisture was performed using the total content of moisture accumulated to depth of 0, 30 m.

The AquaCrop model simulates the growth of green canopy assuming two cases:

$CC \leq \frac{CC_x}{2}$: exponential type growth which is calculated with the equation 2;

$CC > \frac{CC_x}{2}$: exponential senescence which is calculated with the equation 3:

$$CC = CC_o e^{tCGC} \quad (2)$$

$$CC = CC_x - 0,25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \quad (3)$$

where: CC is the green canopy cover over time (t) passed (measured in days); CC_o is the initial coverage of the green canopy ($t=0$); CC_x is the maximum coverage of the green canopy; CGC is the growth rate of the green canopy per unit of time. The AquaCrop model adjusts green canopy growth with respect to density of population ($\text{plants} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Soil characteristics according to the second genetic classification of soils of Cuba, estimated in the Soil Laboratory of Granma Province were:

Type: alluvial.

Texture: clay loam.

Bulk density: $1,42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Field capacity: $0,37 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Permanent wilting point: $17,00 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

de referencia (ET_o); además, considera una concentración media anual de CO_2 en la atmósfera de $369,47 \text{ mg L}^{-1}$ para el año 2000, según las mediciones del observatorio en Mauna Loa, Hawai. Los valores de la concentración de este gas pueden sustituirse con las de las emisiones actuales (Raes *et al.*, 2009).

Estos datos climáticos fueron tomados de la Estación Agrometeorológica de Veguitas la cual se encuentra a una distancia de 3 km de la zona de estudio. La evapotranspiración de referencia se calculó con el software "ETo Calculador ver.3.2" y luego fue exportada al modelo AquaCrop. La producción de biomasa y de grano depende de los parámetros del cultivo, como conductancia estomática, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha.

El modelo AquaCrop estima el requerimiento hídrico del cultivo mediante un balance de humedad en el suelo con la ecuación 1:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j-1} + D + (R + P) + ES + Tr \quad (1)$$

donde: θ es el contenido de humedad volumétrico ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), i es la profundidad a regar (punto inicial del cálculo), j es momento del riego, D es el drenaje por percolación profunda, $R+P$ el riego más la precipitación, ES la evaporación del suelo, Tr la transpiración del cultivo.

AquaCrop proporciona diariamente el contenido de humedad en el suelo en sus diferentes capas en las que se divide el perfil del suelo a intervalos de 0,10 m hasta la profundidad del suelo que es descrito como parámetro de entrada al modelo. La comparación entre la humedad observada y simulada se realizó utilizando el contenido de humedad total acumulada hasta a profundidad de 0,30 m.

El modelo AquaCrop simula el crecimiento del dosel vegetal asumiendo dos casos:

$CC \leq \frac{CC_x}{2}$: Crecimiento tipo exponencial que se presenta para la condición de la ecuación 2.

$CC > \frac{CC_x}{2}$: Senescencia exponencial para la condición de la ecuación 3:

$$CC = CC_o e^{tCGC} \quad (2)$$

$$CC = CC_x - 0,25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \quad (3)$$

donde: CC es la cobertura del dosel vegetal en el tiempo (t) transcurrido en días; CC_o la cobertura inicial del dosel ($t=0$); CC_x la cobertura máxima del dosel vegetal; CGC el coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo. El modelo AquaCrop ajusta el crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población expresado en plantas ha^{-1} .

Las características del suelo según la segunda clasificación genética de los suelos de cuba determinadas en el Laboratorio de Suelos de la provincia Granma fueron las siguientes:

Tipo: aluvial.

Textura: loam arcilloso.

Densidad del suelo: $1,42 \text{ g cm}^{-3}$.

Hydraulic Conductivity: 4, 00 mm·h⁻¹.
 Electrical conductivity of the irrigation water: 0, 30 ds·m⁻¹.

For the dry bean crop, AquaCrop model does not have previously loaded data. In this investigations soybean crop data were utilized, as soybean crop characteristic of production, management and genetic are very similar to the dry bean crop. Adjusted parameters are presented in Table 1.

For none limiting conditions of hydric stress and fertilizers, only the following local parameters, presented in table 2, are necessary (Raes, 2009).

Capacidad de campo: 0,37 cm³cm³.
 Punto de marchitez permanente: 17,00 cm³cm³.
 Conductividad hidráulica: 4,00 mm h⁻¹.
 Conductividad eléctrica del agua: 0,30 ds m⁻¹.

Para el cultivo del frijol el modelo no cuenta con datos precargados, utilizándose los de la soya ya que cuentan con características muy similares de producción, manejo y genética. Los parámetros ajustados se presentan en la Tabla 1.

En condiciones no limitantes de estrés hídrico y fertilizantes solo se requieren según Raes (2009) los siguientes parámetros locales que se muestran en la Tabla 2.

TABLE 1. Conservative parameters of dry bean crop for Granma conditions
TABLA 1. Parámetros conservativos del frijol ajustados para las condiciones de Granma

No.	Description	Value	Unit or meaning
1	Base temperature	15	°C
2	Upper temperature	27	°C
3	Canopy size of the average seedling at 90% emergence.	5	cm ²
4	Maximum canopy cover	92	% plantation density function
5	Water productivity	18	g m ⁻² CO ₂ atmospheric concentration function
6	Reference harvest index	35	(%) normal value for this crop

TABLE 2. Specific parameter for model evaluation
TABLA 2. Parámetros específicos para la evaluación del modelo

No.	Description	Value	Unit or meaning
1	Planting date	20/12/2014	-
2	Planting density	25	plants m ²
3	Days to germination	4	days
4	Maximum canopy cover	92	%
5	Start of senescence	62	days
6	Start of maturity	66	days
7	Start of flowering	43	days
8	Flowering length	22	days
9	Effective rooting depth	0,3	m
10	Harvest index calculated	0,4	-

Evaluation of model performance was carried out by means of the following statistical indicators: coefficient of determination (*R*²); efficiency coefficient (*EF*); root mean square error (*RMSE*); normalized root mean square error (*NRMSE*); index of agreement (*d*).

Coefficient of determination is the resultant of correlate linearly simulated and observed values. It ranges from 0 to 1, with values close to 1 indicating a good agreement, and typically values greater than 0.5 are considered acceptable simulations (Moriassi *et al.*, 2007) and values greater than 0.8 are considered good simulations.

$$R^2 = \frac{Scr}{Sct} \times 100 \tag{4}$$

where: *R*² is the coefficient of determination (%); squared sum because of the regression; the total squared sum.

The Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (*EF*) determines the relative magnitude of the residual variance

La evaluación del modelo se realizó mediante los indicadores estadísticos siguientes: coeficiente de determinación (*R*²); eficiencia del modelo (*EF*); raíz del cuadrado medio del error (*RMSE*); raíz del cuadrado medio del error normalizado (*NRMSE*); e índice de concordancia (*d*).

El coeficiente de determinación (*R*²) es el resultante de correlacionar linealmente los valores simulados y medidos. Típicamente los valores mayores de 0,50 se consideran aceptables en simulaciones (Moriassi *et al.*, 2007) y para valores superiores a 0,80 el ajuste es bueno.

$$R^2 = \frac{Scr}{Sct} \times 100 \tag{4}$$

donde: *R*² es el coeficiente de determinación (%); la suma de cuadrados debido a la regresión; la suma de cuadrados total.

La eficiencia del modelo (*EF*) expresa la eficiencia del modelo en la simulación del parámetro, es decir cuánto de la desviación total entre los valores observados y simulados se desvían de la desviación

compared to the variance of the observations. This parameter is dimensionless and can reach values that vary from $-\infty$ to $+1$ with better model efficiency when they are close to $+1$.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (5)$$

where: EF is model efficiency; the observed values; the simulated values; the mean of observed values.

The root mean square error or (RMSE) is one of the most widely used statistical indicators and measures the average magnitude of the difference between predictions and observations. It ranges from 0 to positive infinity, with the former indicating good and the latter poor model performance. A big advantage of the RMSE is that it summarizes the mean difference in the units of P and O. It does however not differentiate between over and underestimation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2}{N}} \quad (6)$$

where: N is the observations number.

Normalized Root Mean Square Error ($NRMSE$) is a statistic parameter for model evaluation. A simulation can be considered excellent if $NRMSE$ is smaller than 10%, good if between 10 and 20%, fair if between 20 and 30% and poor if larger than 30%.

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2}{N}} \quad (7)$$

Index of agreement (d) is a measurement of the relative error in model estimations. It is a dimensionless number that ranges between 0 and 1, with 0 indicating no agreement and 1 indicating a perfect agreement between the predicted and observed data, typically values greater than 0,65 are considered as high (Krause *et al.*, 2005).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)} \quad (8)$$

RESULTS AND DISCUSSION

In the calculation process of AquaCrop model, development of the canopy cover is the first parameter that is calculated. In Figure 1, observed and simulated canopy cover progression is presented. The model underestimates the canopy cover during the 30 days after sowing. Between 30 and 50 days after sowing the model overestimates canopy cover; this is the period of maximum crop vegetative growth.

In the senescent period after 60 days model overestimates canopy cover, reaching finally a value equal to zero, this variety has as a characteristic that leaf falling occurs almost totally in few days, what can explain the difference with the model; however, the tendency that describes the model curve is similar to reality. The same tendency is showed by (Steduto *et al.*, 2009 and Araya *et al.*, 2010) in the parameterization of maize and

total entre los valores observados y su valor medio. Este parámetro es adimensional y puede alcanzar valores que oscilan desde $-\infty$ hasta $+1$ con mejor eficiencia del modelo cuando están cercanos a $+1$.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (5)$$

donde: EF es la eficiencia del modelo; los valores medidos; los valores simulados; la media de los valores medidos.

La raíz del cuadrado medio del error ($RMSE$) representa una medida de la desviación total o media entre los valores observados y simulados. Es un indicador sintético de la incertidumbre del modelo. El ajuste del modelo mejora cuando el valor es cercano a cero. Este no tiene en cuenta si el error es por exceso o por defecto.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2}{N}} \quad (6)$$

donde: N es el número de observaciones.

La raíz del cuadrado medio del error normalizado ($NRMSE$) es un parámetro estadístico para evaluación del modelo que permite considerar una simulación como excelente cuando se alcanza un valor menor que el 10%; bueno si se encuentra entre 10 y 20%; adecuado si está entre 20 y 30% y pobre si es mayor que 30%. Se emplea la ecuación siguiente:

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2}{N}} \quad (7)$$

El índice de concordancia (d) es una mediada del error relativo en las estimaciones del modelo. Es un número adimensional que varía entre 0 y 1. Cuando el valor es cero describe total discrepancia y cuando es 1 indica que los valores estimados y observados son idénticos. Se consideran valores altos cuando es mayor que 0,65 (Krause *et al.*, 2005)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)} \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el proceso de cálculo del modelo AquaCrop, el desarrollo del grado de cobertura foliar es el primer parámetro que se determina. En la Figura 1 se presenta la progresión de la cobertura foliar observada y simulada. El modelo subestima la cobertura foliar en los primeros 30 días después de la siembra. Entre los 30 y los 50 días el modelo sobreestima la cobertura, este es el periodo de máximo crecimiento vegetativo del cultivo.

En el periodo de senescencia después de los 60 días el modelo sobreestima la cobertura, asumiendo finalmente un valor de cero, esta variedad tiene como característica que la caída de las hojas se produce casi de forma masiva en pocos días, lo que puede explicar la diferencia con el modelo; sin embargo, la tendencia que describe la curva del modelo se asemeja a la realidad. Esa misma tendencia es mostrada por (Steduto *et al.*, 2009; Araya *et al.*, 2010) en la parametrización del maíz y cebada respectivamente.

Estos autores plantean que durante la fase de crecimiento

barley, respectively.

These authors found that during the growth and senescence periods, model shows de highest differences with respect to the observed data where, moreover, highest standard deviations are presented. Correct simulation of canopy cover is essential for AquaCrop representation; because affects the transpiration rate and therefore biomass accumulation (Farahani *et al.*, 2009).

AquaCrop model overestimates the biomass accumulation between 25 and 40 days approximately as can be seen in Figure 2, which is coincident with the overestimation of canopy cover (Figure 1), this supposes a major biomass accumulation. After 50 days observed biomass production was very low, however, model seems to assume a linear growth until 60 days, this is because the model cannot explain the complexity of the environmental processes (Guendouz *et al.*, 2014; Amiri, 2016) (mainly temperature and wind speed variations) and physiological that occur in the plant and their impacts on biomass production. AquaCrop utilizes in the dry biomass accumulation, a linear model highly contrasted (Steduto *et al.*, 2009), where dry biomass is related with crop transpiration through water productivity variable (WP). Intending to normalize this variable it is included in this connection reference evapotranspiration (ET_0).

y de senescencia el modelo muestra las mayores diferencias con respecto a las observaciones donde, además, se tienen las mayores desviaciones estándar. La correcta simulación de la cobertura foliar es fundamental para la representación del AquaCrop; porque afecta la tasa transpiratoria y en consecuencia la acumulación de biomasa (Farahani *et al.*, 2009).

En la Figura 2 se presenta la progresión de la biomasa aérea observada y simulada, se observa que el modelo sobreestima la acumulación de biomasa entre los días 25 y 40 aproximadamente, lo cual es coincidente con la sobreestimación de la cobertura foliar (Figura 1), lo que supone una mayor acumulación de biomasa. Debe señalarse que a partir de los 50 días la producción de biomasa observada fue muy baja, sin embargo, el modelo parece asumir un crecimiento lineal hasta los 60 días, esto se debe a que el modelo no puede explicar los complejos procesos (Guendouz *et al.*, 2014; Amiri, 2016) ambientales (fundamentalmente las variaciones de temperatura y velocidad del viento) y fisiológicos que ocurren en la planta y sus impactos en la producción de biomasa.

Según Steduto *et al.* (2009), AquaCrop utiliza en la simulación de la biomasa seca un modelo lineal altamente contrastado donde se relaciona la biomasa seca con la transpiración del cultivo a través de la variable productividad del agua (WP). Con la intención de normalizar dicha variable, se incluyó en esta relación la evapotranspiración de referencia (ET_0).

En la Figura 3 se observa que la evolución del contenido

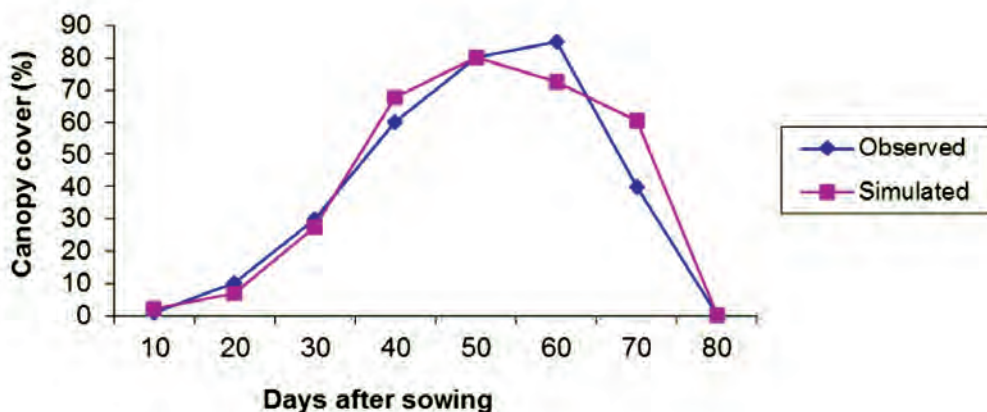


FIGURE 1. Observed and simulated canopy cover progression.
FIGURA 1. Progresión de la cobertura foliar observada y simulada.

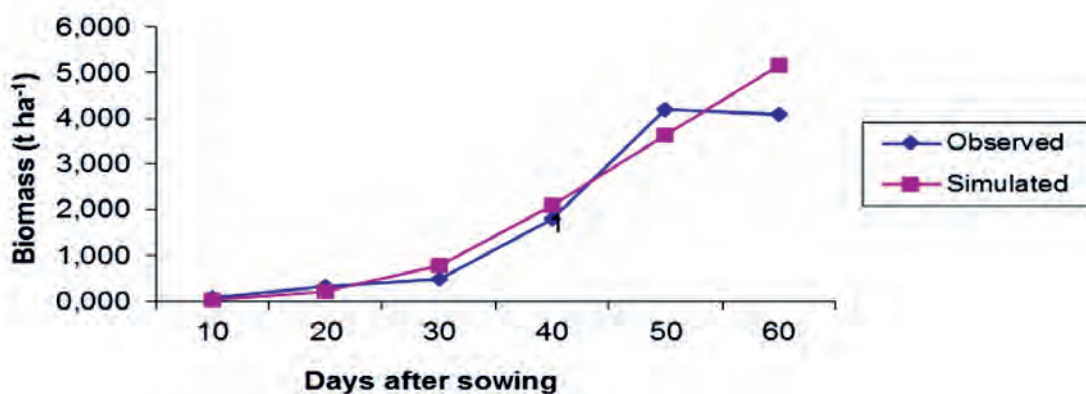


FIGURE 2. Observed and simulated progression of dry biomass.
FIGURA 2. Progresión de la biomasa seca aérea observada y simulada.

In Figure 3 it is observed that the evolution of the soil water content simulated by AquaCrop was similar both in trends and in absolute values to the ones obtained for gravimetric. The model tends to overestimate the evolution of the soil water content in all the realized observations. Between 18 and 61 days it was not necessary to irrigate due to the rains happened in the period.

tota de humedad simulada por AquaCrop fue similar tanto en tendencias como en valores absolutos a los obtenidos por gravimetría. El modelo tiende a sobrestimar el contenido de humedad en todas las observaciones realizadas. Entre los 18 y 61 días no se pudo regar debido a las lluvias ocurridas en el período.

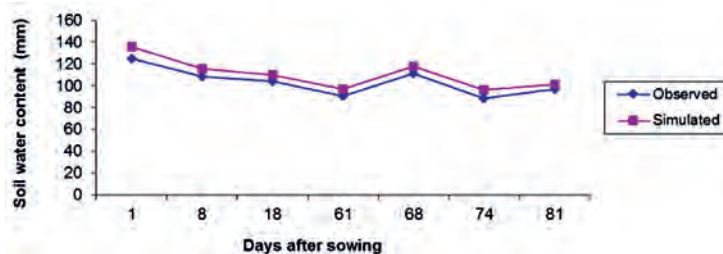


FIGURE 3. Observed and simulated soil water content to 0-30 cm depth.
 FIGURA 3. Contenido de humedad observado y simulado a una profundidad de 0-30 cm.

In general it is considered that the simulation of the development phases was satisfactory; since the statistical indicators for the CF are good (Table 3). There was obtained a high R^2 (0,95), the NRMSE is inside the limits of $\pm 20\%$. EF and d values are high according to Krause et al. (2005); Moriasi et al. (2007).

De forma general se considera que la simulación de las fases de desarrollo fue satisfactoria; pues los indicadores estadísticos para la CF son buenos (Tabla 3). Se obtuvo un R^2 elevado (0,95), el NRMSE se encuentra dentro de los límites del $\pm 20\%$. Los valores de EF y d son altos según los criterios de Krause et al. (2005); Moriasi et al. (2007).

The statistical indicator obtained in the BSA simulation during the crop period showed good adjustments between the observed and simulated dates with a high coefficient of determination ($R^2=95$), low errors in the BSA ($RMSE=0,45\ t\ h^{-1}$), the NRMSE was acceptable (10-20 %) and the EF and d values of 0,94 and 0,98 were very high respectively.

Los estadísticos obtenidos en la simulación de BSA a lo largo del ciclo del cultivo mostraron buenos ajustes entre los datos observados y simulados con un coeficiente de determinación elevado ($R^2=95$), bajos errores en la BSA ($RMSE=0,45\ t\ ha^{-1}$), el NRMSE fue aceptable (10-20%) y los valores de EF y d fueron muy altos 0,94 y 0,98 respectivamente.

The statistical indicator obtained in the BSA simulation during the crop period showed good adjustments between the observed and simulated dates with a high coefficient of determination ($R^2=95$), low errors in the BSA ($RMSE=0,45\ t\ h^{-1}$), the NRMSE was acceptable (10-20 %) and the EF and d values of 0,94 and 0,98 were very high respectively.

El valor del R^2 obtenido entre la humedad simulada y las observaciones de campo resultó ser de 0,81, el cual es considerado como aceptable al ser superior a 0.5 (Moriasi et al., 2007). Los estadísticos de los datos de humedad acumulada en el suelo a 0,30 m indican que los errores obtenidos son inferiores a 7,3 mm. En cuanto a la agregación del modelo, esta es considerada como aceptable, con valores de EF y d de 0,63 y 0,92 respectivamente. Estas diferencias de error se deben a la heterogeneidad del suelo en el cálculo del balance de agua a diferentes profundidades (Delgoda et al., 2016; Montoya et al., 2016).

The value of the R^2 obtained between the simulated soil water content and the field observations was 0,81, which is considered acceptable because it is superior to 0,5 (Moriasi et al., 2007). The statistical of the accumulated soil water content to 0, 30 m indicate that the obtained errors are lower than 7,3 mm. As for the aggregation of the model, this is considered acceptable, with EF and d values of 0, 63 and 0, 92, respectively. These differences of errors are due to the heterogeneity of the soil in the calculation of the water balance to different depths (Delgoda et al., 2016; Montoya et al., 2016).

TABLE 3. Statistical indicators to evaluate simulation results
 TABLA 3. Índices estadísticos para evaluar los resultados de la simulación

	CF		BSA		CHS	
	R^2	0,95	R^2	0,95	R^2	0,99
RMSE (%)		7,9	RMSE (t ha ⁻¹)	0,45	RMSE (mm)	7,3
NRMSE (%)		20	NRMSE (%)	17,0	NRMSE (%)	7
EF		0,94	EF	0,94	EF	0,63
d		0,99	d	0,98	d	0,92

CONCLUSIONS

- The evolution of the variables canopy cover, dry biomass and soil water content simulated by AquaCrop were similar

CONCLUSIONES

- La evolución de las variables cobertura foliar, biomasa seca aérea y contenido total de humedad simuladas por Aqua-

- in tendencies and in absolute values to the observed ones.
 - Taking the statistical indicators: R^2 , $RMSE$, $NRMSE$, EF and d as criteria, it was possible to prove that the model can adequately reproduce the variables observed.
- Tomando como criterio los indicadores estadísticos: R^2 , $RMSE$, $NRMSE$, EF , d se pudo comprobar que el modelo es capaz de reproducir las variables observadas de forma satisfactoria.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIRI, E.: "Calibration and Testing of the Aquacrop Model for Rice under Water and Nitrogen Management", *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3): 387-403, 4 de febrero de 2016, ISSN: 0010-3624, DOI: 10.1080/00103624.2015.1123719.
- AMIRI, E.; REZAEI, M.; REZAEI, E.E.; BANNAYAN, M.: "Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza2000 Models in Simulation of Rice Yield Response to Different Irrigation and Nitrogen Management Strategies", *Journal of Plant Nutrition*, 37(11): 1749-1769, 19 de septiembre de 2014, ISSN: 0190-4167, DOI: 10.1080/01904167.2014.888750.
- ARAYA, A.; HABTU, S.; HADGU, K.M.; KEBEDE, A.; DEJENE, T.: "Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*)", *Agricultural Water Management*, 97(11): 1838-1846, 1 de noviembre de 2010, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2010.06.021.
- DELGODA, D.; MALANO, H.; SALEEM, S.K.; HALGAMUGE, M.N.: "Irrigation control based on model predictive control (MPC): Formulation of theory and validation using weather forecast data and AQUACROP model", *Environmental Modelling & Software*, 78: 40-53, abril de 2016, ISSN: 1364-8152, DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.12.012.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H.: "Yield response to water", *Irrigation and Drainage paper*, 33: 257, 1979, ISSN: 0254-5284.
- FARAHANI, H.J.; IZZI, G.; OWEIS, T.Y.: "Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton", *Agronomy Journal*, 101(3): 469, 2009, ISSN: 1435-0645, DOI: 10.2134/agronj2008.0182s.
- GUENDOUZ, A.; HAFSI, M.; MOUMENI, L.; KHEBBAT, Z.; ACHIRI, A.: "Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semi arid conditions in Eastern Algeria", *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(2): 168-176, 2014, ISSN: 2319-7692, 2319-7706.
- KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BÄSE, F.: "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment", *Advances in Geosciences*, 5: 89-97, diciembre de 2005, ISSN: 1680-7340, 1680-7359.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, M.F.; LÓPEZ, F.P.; CALERA, B.A.: *Agua y agronomía*, Ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 2005, ISBN: 978-84-8476-246-1.
- MASANGANISE, J.; CHIPINDU, B.; MHIZHA, T.; MASHONJOWA, E.: "Model prediction of maize yield responses to climate change in north-eastern Zimbabwe", *African Crop Science Journal*, 20(2): 505 - 515, 2012, ISSN: 2072-6589, DOI: 10.4314/acsj.v20i2.
- MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J.F.; CÓRCOLES, J.I.; DOMÍNGUEZ, A.: "Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions", *Agricultural Water Management*, 164, Part 2: 267-280, 31 de enero de 2016, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.10.019.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; LIEW, M.W.V.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L.: "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations", *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900, 2007, ISSN: 2151-0040, DOI: 10.13031/2013.23153.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: "AquaCropThe FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description", *Agronomy Journal*, 101(3): 438, 2009, ISSN: 1435-0645, DOI: 10.2134/agronj2008.0140s.
- REZA, T.A.; MAHDAVI, M.M.; REZA, S.A.: "Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran", *Agricultural Water Management*, 161: 136-146, noviembre de 2015, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.07.020.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E.: "AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles", *Agronomy Journal*, 101(3): 426, 2009, ISSN: 1435-0645, DOI: 10.2134/agronj2008.0139s.
- STRICEVIC, R.; DJUROVIC, N.; VUKOVIC, A.; VUJADINOVIC, M.; COSIC, M.; PEJIC, B.: "Application of AquaCrop model for yield and irrigation requirement estimation of sugar beet under climate change conditions in Serbia", *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 59(3): 301-317, 2014, ISSN: 1450-8109, DOI: 10.2298/JAS1403301S.
- TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A.: "Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management", *Agricultural Water Management*, 163: 219-235, 1 de enero de 2016, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.09.007.
- TROMBETTA, A.; IACOBELLIS, V.; TARANTINO, E.; GENTILE, F.: "Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images", *Agricultural Water Management*, 164, Part 2: 304-316, 31 de enero de 2016, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.10.013.

Received: 17/10/2015.

Approved: 03/06/2016.

Norge Tornés Olivera, Jefe de Departamento de Producción Agrícola, Universidad de Granma (UDG), Bayamo. Granma, Cuba. E-mail: ntorneso@udg.co.cu

Oscar Brown Manrique, E-mail: obrown@unica.cu

Yarisbel Gómez Masjuan, E-mail: yarisbet@udg.co.cu

Arnaldo Manuel Guerrero Alega, E-mail: arnaldo@udg.co.cu

Note: the mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obey identification purposes, not existing any promotional commitment with relationship to them, neither for the authors nor for the editor.