

SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN EL NORTE DE SINALOA USANDO EL MODELO AQUACROP

SIMULATION OF CORN (*Zea mays* L.) YIELD IN NORTHERN SINALOA USING THE AQUACROP MODEL

Hilario Flores-Gallardo^{1*}, Waldo Ojeda-Bustamante², Héctor Flores-Magdaleno³,
Ernesto Sifuentes-Ibarra⁴, Enrique Mejía-Saénz³

¹INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle del Guadiana. 34170. Carretera Durango-El Mezquital km 4.5, Durango, México. (flores.hilario@inifap.gob.mx). ²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8535. 62550. Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México. ³Colegio de Postgraduados. Programa de Hidrociencias. 56230. Carretera México- Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ⁴INIFAP-CIRNO-Campo Experimental del Valle del Fuerte. 81110. Carretera México-Nogales km 1609. Gral. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México.

RESUMEN

La intensificación de la variabilidad climática ha generado incertidumbre en los volúmenes de agua disponible en varias zonas de riego de México, ocasionan inestabilidad en la productividad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Los modelos calibrados de simulación biológica son una herramienta computacional viable para estudiar el comportamiento de los cultivos en condiciones climáticas y escenarios de manejo agronómico e hídrico diferentes. En la presente investigación se calibró y validó el modelo AquaCrop para simular el desarrollo del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa, México, con tres condiciones de disponibilidad hídrica: riego total (*RT*) y riego deficitario (80 % y 60 % respecto a *RT*). Para calibrar y validar el modelo se compararon datos observados y simulados de cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa en la cosecha y rendimiento de grano, con datos experimentales de parcelas comerciales de maíz establecidas en los ciclos agrícolas otoño-invierno (O-I) de 2003-2004, 2007-2008 y 2008-2009, y los ciclos primavera-verano (P-V) de 2008 y 2009. Las predicciones del rendimiento de grano del modelo fueron buenas con un valor de 0.79 t ha⁻¹ para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) y un índice de Willmott (*d*) de 0.85. El modelo AquaCrop previamente calibrado y validado, es una alternativa para conocer la respuesta del maíz con riego deficitario y condiciones climáticas contrastantes.

ABSTRACT

The intensification of climate variability has caused uncertainty in available water volumes in several irrigation areas of Mexico; this has led to instability in the productivity of corn crop (*Zea mays* L.). Biological simulation models, once calibrated, are a feasible computational tool to study the behavior of crops under climatic conditions and different scenarios of agronomic and water management. In this study the AquaCrop model was calibrated and validated to simulate the development of corn crop in northern Sinaloa, Mexico, with three conditions of water availability: full irrigation (*RT*) and deficit irrigation (80 % and 60 % with respect to *RT*). To calibrate and validate the model, observed and simulated data of green canopy cover, biomass production at harvest and grain yield were compared, using experimental data from commercial corn plots established in the fall-winter agricultural seasons (O-I) 2003-2004, 2007-2008 and 2008-2009, and the spring-summer seasons (O-I), 2008 and 2009. The grain yield predictions of the model were good with a value of 0.79 t ha⁻¹ for the root mean square error (*RMSE*) and Willmott's index of agreement (*d*) was of 0.85. The AquaCrop model previously calibrated and validated is an alternative for the answer of corn crop with deficit irrigation and contrasting climatic conditions.

Key words: Biomass, water requirements, climatic variability.

INTRODUCTION

About 80 countries, with 40 % of the world population, suffer from serious problems of water scarcity (Walker and Skogerboe, 1987).

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2012. Aprobado: abril, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 347-359. 2013.

Palabras clave: Biomasa, requerimientos hídricos, variabilidad climática.

INTRODUCCIÓN

Cerca de 80 países, con 40 % de la población mundial, padecen problemas graves por escasez de recursos hídricos (Walker y Skogerboe, 1987). Sólo 20 % de la superficie cultivada mundial es con riego y varias zonas tienen problemas de incertidumbre en los volúmenes disponibles en sus fuentes de abastecimiento. El riego es indispensable para asegurar rendimientos comerciales aún en zonas con precipitación alta (Wanjura y Upchurch, 2000). El agua es un bien escaso y vital que asegura la producción agrícola económicamente viable; en México las zonas grandes de riego se ubican en regiones áridas y semiáridas que requieren regulación y distribución adecuada del agua, (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

El desarrollo y popularización de computadoras proporciona herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos numerosos. Esto permite el desarrollo de sistemas computacionales para analizar el comportamiento y respuesta biológica de los sistemas de producción agrícola en escenarios de manejo diferentes y condiciones climáticas contrastantes. La posible intensificación del ciclo hidrológico, con cambios en los patrones climáticos actuales por efectos del cambio climático, demanda el uso frecuente de herramientas para conocer con mayor certidumbre la respuesta de los cultivos en condiciones climáticas cambiantes. 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 (1979). 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 (Monteith, 1996). Ahora se usan modelos diferentes para simular la respuesta de los

Only 20 % of the cultivated area worldwide is irrigated and several areas have problems of uncertainty in available volumes in its sources of supply. Irrigation is essential to ensure commercial yields even in areas of high rainfall (Wanjura and Upchurch, 2000). Water is a scarce and vital resource to ensure economically viable agricultural production; in Mexico large irrigation areas are located in arid and semiarid regions that require adequate regulation and distribution of water (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

The development and popularization of computers provide tools to store large volumes of data and perform numerous calculations. This allows the development of computer systems to analyze the behavior and biological response of agricultural production systems in different management scenarios and contrasting climatic conditions. The possible intensification of the hydrological cycle, with changes in current weather patterns by climate change, require frequent use of tools to know with greater certainty the response of crops to changing climatic conditions. The crop response to water deficit is complex and usually empirical functions are used for estimating yields based on the level of water deficit during part or all of the crop cycle. One of the methods more used to estimate yield with empirical parameters, calibrated in field experiments and different levels of crop water stress, is that developed by Doorenbos and Kassam (1979). Another alternative is the biophysical simulation models of crops that manage relationships to predict the growth, development and yield of the crop with the genetic characteristics, agronomic and environmental conditions during the crop development (Monteith, 1996). Now, different models are used to simulate the crop response under different conditions of production at plot level. Biological simulation models can be used to estimate the potential production and identify factors limiting production or to analyze changes in water management of crops (López-Cruz *et al.*, 2005). The biophysical model most widely used is the DSSAT which allow to estimate the effects of management practices and environmental conditions on crops (Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2012). The DSSAT new version contains models for 17 crops, including corn (*Zea mays* L.), derived from models DSSAT-CROPGRO and CERES. Other models to simulate the development of corn crop are CERES-

cultivos en condiciones diversas de producción a nivel parcelario. 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-Cruz *et al.*, 2005). El modelo biofísico más usado es el DSSAT, que permite estimar los efectos de las prácticas de manejo y las condiciones ambientales en los cultivos (Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2012). La versión nueva del DSSAT contiene modelos para 17 cultivos, entre ellos el maíz (*Zea mays* L.), derivados de los modelos DSSAT-CROPGRO y CERES. Otros modelos para simular el desarrollo del cultivo de maíz son CERES-Maize (Jones *et al.*, 1986), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003) y Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004). Según Heng *et al.* (2009), estos modelos sofisticados demandan habilidades para su calibración y operación porque requieren un número grande de parámetros, algunos específicos para los cultivares; esto complica su adopción por los agricultores o usuarios finales.

El modelo AquaCrop liberado por la FAO (Raes *et al.*, 2009a) 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). 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.*, 2009b), y se ha calibrado con buen ajuste y resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo. Pero no se ha reportado su aplicación para las condiciones de manejo y clima de la agricultura mexicana, por lo cual se requiere la calibración local con datos experimentales (Hussein *et al.*, 2011).

La seguridad alimentaria es un reto en México para producir suficiente cantidad de alimentos, con calidad alta y precio accesible. La agricultura de riego es importante para responder al aumento de la demanda de alimentos de la población creciente; aunque la superficie de cultivo ha permanecido casi estable en las últimas cuatro décadas (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2012). El maíz es cultivado en la mayoría de las zonas con riego y temporal, pero

Maize (Jones *et al.*, 1986), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000), Crop-Syst (Stöckle *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003) and Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004). According to Heng *et al.* (2009), these sophisticated models require skills for calibration and operation because they require a large number of parameters, some specific to cultivars; this complicates their adoption by farmers or end users.

The AquaCrop model released by FAO (Raes *et al.*, 2009a) can be used as a computational tool for analyzing agricultural scenarios in different locations and seasons (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). This deterministic model is aimed at users with limited computer knowledge, is simple without losing accuracy because it uses a small number of parameters compared to other commercial biophysical models (Raes *et al.*, 2009b), and has been calibrated with good fit and experimental results in several agricultural regions of the world. However, its application to the management and climate conditions of the Mexican agriculture has not been reported, so it requires local calibration with experimental data (Hussein *et al.*, 2011).

Food security is a challenge in Mexico to produce enough food, with high quality and accessible price. Irrigated agriculture is important to respond to increased food demand of the growing population, although the area under cultivation has remained almost stable over the past four decades (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2012). Corn crop is grown in most irrigation and rainfed areas, but Mexico is not self-sufficient and imports around 8 million t annually, equivalent to a third part of the grain needs (SAGARPA, 2007). Some external and internal factors that complicate the supply of corn and reducing its production in 2011 are the demand increase for production of ethanol in the last decade, increased production costs, climate variability and recurrent droughts, which increase pressure on water resources for agricultural use (SIAP, 2012). Therefore, tools are needed to analyze different management scenarios under low water availability, to improve water use and reduce the effect on crop yields.

In this study the AquaCrop model was calibrated and validated with experimental data obtained from commercial corn plots in the irrigation district 075 "Rio Fuerte", Sinaloa, Mexico. The effect of water stress was studied and the impact of some

México no es autosuficiente e importa alrededor de 8 millones t anualmente, esto es la tercera parte de sus necesidades (SAGARPA, 2007). Algunos factores externos e internos que complican el abastecimiento de maíz y la reducción de su producción en el 2011 son el aumento de la demanda para producir de etanol en la última década, aumento de los costos de producción, variabilidad climática y recurrencia de sequías, que aumentan la presión en los recursos hídricos para uso agrícola (SIAP, 2012). Por tanto, se requieren herramientas que permitan analizar escenarios de manejo diferentes en condiciones de baja disponibilidad hídrica, para mejorar el uso del agua y reducir los efectos en los rendimientos de los cultivos.

En esta investigación se calibró y validó el modelo AquaCrop con datos experimentales obtenidos de parcelas comerciales de maíz en el distrito de riego 075 "Río Fuerte", Sinaloa, México. El efecto del estrés hídrico se estudió y se cuantificó el impacto de algunas prácticas de manejo con disponibilidad hídrica con riego total (*RT*) y riego deficitario (80 y 60 % respecto a *RT*), para estimar rendimientos de maíz con fechas de siembra diferentes y determinar las fechas óptimas de siembra según el modelo AquaCrop en ese distrito. El modelo, calibrado y validado, será una herramienta para analizar el comportamiento del cultivo de maíz bajo diferentes escenarios de manejo agronómico, hídrico y condiciones climáticas contrastantes en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La investigación se realizó en el área del distrito de riego 075 "Río Fuerte" (DR-075), en la zona árida del norte de Sinaloa, México (25° 48.89' N, 109° 1.53' O y altitud promedio de 20 m). Los suelos predominantes tienen textura franco arcillosa típicamente con 50, 30 y 20 % de arcilla, limo y arena, <1 % de materia orgánica, densidad aparente 1.2 g cm⁻³ y humedad aprovechable volumétrica 15 % (Iníiguez-Covarrubias *et al.*, 2011; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006). La temperatura media anual es 24.6 °C y la precipitación acumulada 340 mm (concentrada de julio a octubre), la evapotranspiración de referencia (*ET_o*) media anual es 4.2 mm d⁻¹ con un intervalo de 2.3 a 6 mm d⁻¹ (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). El DR-075, con 287 383 ha, es uno de los distritos de riego más grandes del país, 45 % de su superficie anual cosechada es ocupada por

management practices was quantified with water availability with total irrigation (*RT*) and deficit irrigation (80 and 60 % with respect to *RT*), to estimate corn yields with different sowing dates and determine optimal sowing dates according to the AquaCrop model in that district. The model, calibrated and validated, will be a tool for analyzing behavior of corn crop under different agronomic management scenarios, water and contrasting weather conditions in Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The study was conducted in the area of the irrigation district 075 "Río Fuerte" (DR-075), in the arid zone in the north of the State of Sinaloa, Mexico (25° 48.89' N, 109° 1.53' W and 20 m altitude). The predominant soils are typically of clay loam texture with 50, 30 and 20 % clay, silt and sand, <1 % organic matter, apparent density 1.2 g cm⁻³ and volumetric available moisture 15 % (Iníiguez-Covarrubias *et al.*, 2011; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006). The average annual temperature is 24.6 °C and the accumulated rainfall of 340 mm (concentrated from July to October), the annual average reference of evapotranspiration (*ET_o*) is 4.2 mm d⁻¹ with an interval of 2.3 to 6 mm d⁻¹ (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). The DR-075, with 287 383 ha, is one of the largest irrigation districts of the country, 45 % of its annual harvested area is occupied by corn crop and its average yield in the 2009-2010 agricultural year was 10.77 t ha⁻¹ (CONAGUA, 2012).

For calibration and validation of the model data of an experiment conducted in an area of 40 ha, with clay loam texture soil (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006) were used. In that experiment water volumes applied to the corn variety Pioneer 30G54 were measured in the O-I season 2003-2004, the sowing date was November 24, 2003, 1451.1 °D with threshold temperatures of 10 to 30 °C, maturity was reached 179 d after sowing, the population density was 95 000 plants ha⁻¹ and yield 10.7 t ha⁻¹ (Table 1).

Information for calibration and validation of the model was supplemented with data from commercial plots in the region, with clay loam texture, of agricultural O-I and P-V, seasons with corn varieties, sowing dates and densities of different populations of the agricultural years 2007-2008 and 2008-2009 (Table 2). The irrigations were estimated with the forecast irrigation system in real time (SPRITER), which was validated for that area and used by the DR-075's irrigation modules (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2007).

maíz y su rendimiento promedio en el año agrícola 2009-2010 fue 10.77 t ha⁻¹ (CONAGUA, 2012).

Para calibrar y validar el modelo se usaron datos del experimento realizado en una superficie de 40 ha, de suelo con textura franco arcillosa (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006). En ese experimento se midieron las láminas de riego aplicadas al cultivo de maíz variedad Pioneer 30G54, en el ciclo O-I 2003-2004, la fecha de siembra fue 24 de noviembre del 2003, 1451.1 °D con temperaturas umbrales de 10 a 30 °C, la madurez se alcanzó 179 d después de la siembra, la densidad de población fue 95 000 plantas ha⁻¹ y el rendimiento 10.7 t ha⁻¹ (Cuadro 1).

La información para calibrar y validar el modelo se complementó con datos de parcelas comerciales de la región, con textura franco arcillosa, de los ciclos agrícolas O-I y P-V, con variedades de maíz, fechas de siembra y densidades de población diferentes, de los años agrícolas 2007-2008 y 2008-2009 (Cuadro 2). Los riegos fueron estimados con el sistema de pronóstico del riego en tiempo real (SPRITER), validado para esa zona y usado por los módulos de riego del DR-075 (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2007).

Descripción del modelo AquaCrop

De acuerdo con Raes *et al.* (2009a), el modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones que con datos de clima, densidad de

Description of the AquaCrop model

According to Raes *et al.* (2009a), the AquaCrop model consists of several equations that with data of climate, population density, genetic characteristics, soil type, fertilization level and water stress level, simulate crop growth and yield (Figure 1).

The AquaCrop model requires the following daily, each ten days or monthly weather information: maximum temperature (T_{max}), minimum temperature (T_{min}), precipitation (Pp) and reference evapotranspiration (ET_0); also considers an annual average concentration of CO₂ in the atmosphere of 369.47 ppm for the year 2000 according to measures of the observatory at Mauna Loa, Hawaii. The values of the concentration of this gas can be replaced with those of the current emissions (Raes *et al.*, 2009b). Biomass and grain production depends on crop parameters such as stomatal conductance, senescence of the vegetal canopy, water productivity and harvest index. The general equation for estimating crop yield (Y) is the equation (1):

$$Y = B * H_i \quad (1)$$

where B is the crop biomass and H_i is the harvest index, which depends on the variety or hybrid of the crop.

Cuadro 1. Láminas de riego aplicadas en el experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006).

Table 1. Irrigation levels applied in the experiment of Ojeda-Bustamante *et al.* (2006).

Numero de riego	Fecha	Intervalo (días)	Días a partir de la fecha de siembra	$\sum^{\circ}D^{\dagger}$	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
Riego asiento	Nov-04-2003	0	-20	0	141.0	235.0
2	Ene-27-2004	84	64	424.72	44.5	74.2
3	Mar-01-2004	34	98	580.13	73.7	122.8
4	Mar-24-2004	23	121	778.48	86.1	143.4
5	Abr-23-2004	30	151	980.00	96.9	161.5
Total		-	-	-	442.2	736.9

[†] $\sum^{\circ}D = \sum^{\circ}D$ acumulados a partir de la siembra.

Cuadro 2. Datos de las parcelas comerciales de maíz de los ciclos agrícolas O-I y P-V (2007-2008 y 2008-2009).

Table 2. Data from commercial corn plots of agricultural seasons O-I and P-V (2007-2008 and 2008-2009).

Parcela Año	Ciclo agrícola	Superficie (ha)	Fecha de siembra	Varietal	Densidad de población (plantas ha ⁻¹)
Parcela 07-08	O-I	10	14-dic	Bisonte	133 333
Parcela 08-09	O-I	20	05-dic	Cebú	106 666
Parcela 2008	P-V	10	25-feb	Bisonte	100 000
Parcela 2009	P-V	10	29-feb	Pantera	93 333

población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo (Figura 1).

El modelo AquaCrop requiere la siguiente información meteorológica diaria, decenal o mensual: temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia (ET_0); además, considera una concentración media anual de CO_2 en la atmósfera de 369.47 ppm para el año 2000, según las mediciones del observatorio en Mauna Loa, Hawaii. Los valores de la concentración de este gas pueden substituirse con las de las emisiones actuales (Raes *et al.*, 2009b). 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 (1):

$$Y = B * H_i \quad (1)$$

donde B es la biomasa del cultivo y H_i es el índice de cosecha que depende de la variedad o híbrido del cultivo.

En la simulación del desarrollo del cultivo se genera la respuesta posible al estrés térmico que pueda presentarse, según las condiciones climáticas durante su ciclo de desarrollo; se estima de acuerdo con las condiciones del clima a partir de la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. 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. Según Heng *et al.* (2009) y Raes *et al.* (2009b), el modelo AquaCrop es una herramienta viable para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo. Por tanto, es útil para planear y evaluar estrategias en diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra. El modelo AquaCrop estima el requerimiento hídrico del cultivo mediante un balance de humedad en el suelo con la ecuación 2:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j-1} + D + (R + P) + ES + Tr \quad (2)$$

donde θ es la variable dependiente, i es la profundidad a regar (punto inicial del cálculo), j es el contenido de humedad actualizado al momento del siguiente riego, D es el drenaje por percolación profunda, $R + P$ son el riego más la precipitación, ES es la evaporación del suelo, Tr es la transpiración del cultivo.

In the simulation of crop development the possible response is generated to heat stress which may be arisen, depending on weather conditions during its development cycle; it is estimated according to the weather conditions from sowing date and is used especially for the pollination period. The model considers three types of response to water stress: 1) inhibition of the expansion of green canopy, 2) acceleration of green canopy senescence and 3) stomatal closure. To quantify the impact of water stress for each response, the model considers a curve that is activated when reaching established limits for soil moisture. According to Heng *et al.* (2009) and Raes *et al.* (2009b), the AquaCrop model is a viable tool to evaluate the effect of water stress on crop yield during various stages of development. Therefore, it is useful for planning and evaluating strategies under different conditions of water availability, irrigation

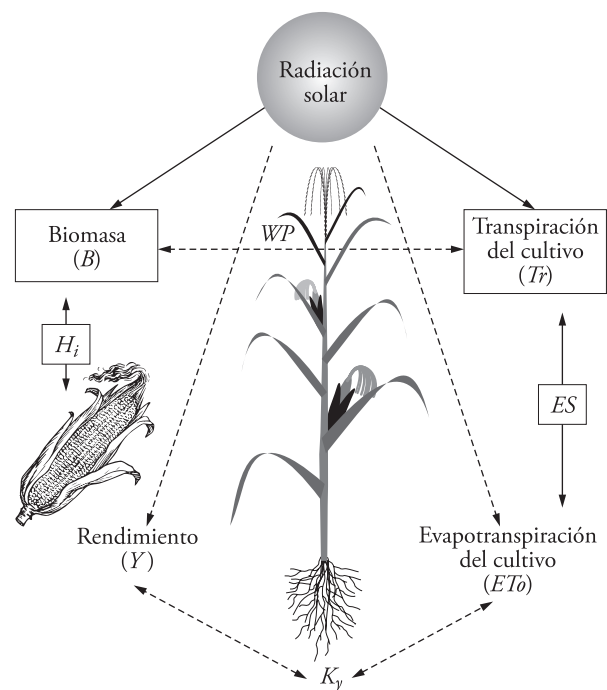


Figura 1. Operación y lógica en la simulación con el modelo AquaCrop, con la separación de la evaporación del suelo (ES), transpiración (Tr), rendimiento (Y), biomasa (B) e índice de cosecha (H_i). WP : productividad del agua y K_y : factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptado de Raes *et al.*, 2009a).

Figure 1. Operation and logics in simulation with the AquaCrop model, with the separation of soil evaporation (ES), transpiration (Tr), yield (Y), biomass (B) and harvest index (H_i). WP : water productivity and K_y : ratio factor between lost yield and reduction in evapotranspiration (adapted from Raes *et al.*, 2009a).

El modelo AquaCrop simula el crecimiento del dosel vegetal asumiendo dos casos: el crecimiento tipo exponencial que se presenta para la condición $CC \leq \frac{CC_x}{2}$, con la ecuación 3; y la senescencia exponencial para la condición $CC > \frac{CC_x}{2}$ con la ecuación 4:

$$CC = CC_o e^{tCGC} \text{ para } CC \leq \frac{CC_x}{2} \quad (3)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \text{ para } CC > \frac{CC_x}{2} \quad (4)$$

donde CC es la cobertura del dosel vegetal en el tiempo (t) transcurrido (en días o grado día desarrollo), CC_o es la cobertura inicial del dosel ($t=0$), CC_x es la cobertura máxima del dosel vegetal, CGC es 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 (plantas ha^{-1}). Cuando se carece de la cobertura vegetal requerida por el AquaCrop se estima con los datos de índice de área foliar (IAF). Para maíz el AquaCrop tiene implementada la ecuación 5:

$$CC = 1.005 [1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2} \quad (5)$$

El cálculo de los grados día ($^{\circ}D$) se realiza con la ecuación 6.

$$\begin{aligned} ^{\circ}D &= T_a - T_{c-\min}, T_a > T_{c-\min} \\ ^{\circ}D &= 0, T_a \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (6)$$

La temperatura promedio T_a se estimó con el método 3 del AquaCrop, con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-\max} \\ T_a &= \frac{T_{c-\max} + T_n}{2}, T_x \geq T_{c-\max} \\ T_a &= \frac{T_{c-\min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (7)$$

donde $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$ son las temperaturas mínimas y máximas del aire en el que la planta se desarrolla, y T_x y T_n son las temperaturas máxima y mínima del día, registradas en una estación meteorológica. Aunque el maíz puede sobrevivir temperaturas adversas entre 0 °C y 45 °C, las temperaturas de desarrollo del maíz que el AquaCrop considera para estimar $^{\circ}D$, son 8 °C y 30 °C para $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$; pero, debido a que la zona de estudio es árida, se utilizaron 10 °C y 30 °C.

system, soil type and planting date. The AquaCrop model estimates the water requirement of the crop by a balance of moisture in the soil with equation 2:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j-1} + D + (R+P) + ES + Tr \quad (2)$$

where θ is the dependent variable, 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, $R+P$ are irrigation plus precipitation, ES is soil evaporation, Tr is the transpiration of the crop.

The AquaCrop model simulates the growth of green canopy assuming two cases: exponential type growth which is presented for the condition $CC \leq \frac{CC_x}{2}$ with the equation 3; and the exponential senescence for $CC > \frac{CC_x}{2}$ condition with equation 4:

$$CC = CC_o e^{tCGC} \text{ for } CC \leq \frac{CC_x}{2} \quad (3)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \text{ for } CC > \frac{CC_x}{2} \quad (4)$$

where CC is the green canopy cover over time (t) elapsed (in days or degree day development), 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 (plants ha^{-1}). In the absence of green canopy cover required by AquaCrop it is estimated with data from leaf area index (LAI). For corn crop AquaCrop has implemented equation 5:

$$CC = 1.005 [1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2} \quad (5)$$

Calculation of degree days ($^{\circ}D$) is performed with equation 6:

$$\begin{aligned} ^{\circ}D &= T_a - T_{c-\min}, T_a > T_{c-\min} \\ ^{\circ}D &= 0, T_a \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (6)$$

Average temperature T_a was estimated with the method 3 of AquaCrop, with the following equations:

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-\max} \\ T_a &= \frac{T_{c-\max} + T_n}{2}, T_x \geq T_{c-\max} \\ T_a &= \frac{T_{c-\min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (7)$$

Para la simulación del crecimiento del cultivo de maíz se utilizaron los parámetros conservativos o constantes del modelo AquaCrop, obtenidos de experimentos de maíz realizados en España y EE.UU. (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009). Esos parámetros son aplicables a una amplitud de condiciones climáticas y no dependen de la variedad o híbrido utilizado en los experimentos de Heng *et al.* (2009) y Hsiao *et al.* (2009).

Análisis de datos y tratamientos simulados

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 con el experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), la validación se hizo mediante análisis estadísticos de los datos de rendimiento, biomasa y duración del ciclo del cultivo reales y los simulados con los parámetros ya calibrados, con los parámetros conservativos o constantes y con los parámetros de entrada requeridos por el modelo AquaCrop. Se usó la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) y el índice de Willmott (*d*) de acuerdo con Willmott (1982), y se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{1/(n) \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

donde S_i y O_i son los valores simulados y observados, n es el número de observaciones y \bar{O}_i es la media de los valores de O_i .

De acuerdo con Heng *et al.* (2009) es factible utilizar las ecuaciones anteriores, ya que: la *RMSE* (ecuación 8) 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. El valor *d* (ecuación 9) varía de 0 a 1.0 y en ambos análisis se aplicaron secuencialmente a los datos observados y simulados.

Los tratamientos simulados de crecimiento del cultivo del maíz se realizaron estimando los requerimientos de riego para fechas diferentes de siembra y el rendimiento de grano y biomasa (en materia seca), en el sistema de riego por gravedad, con las siguientes condiciones de disponibilidad hídrica del suelo: 1) riego total (*RT*) sin restricción de agua porque una vez terminado

where T_{c-min} and T_{c-max} are the minimum and maximum temperatures of the air in which the plant develops, and T_x and T_n are the maximum and minimum temperatures of the day, recorded at a weather station. Although corn crop can survive adverse temperatures between 0 and 45 °C, the temperatures for the development of corn crop that AquaCrop considers for estimating °D, are 8 °C and 30 °C for T_{c-min} and T_{c-max} ; but because the study area is arid 10 and 30 °C were used.

To simulate the growth of corn crop conservative or constant parameters of the AquaCrop model were used, obtained from corn experiments conducted in Spain and USA (Heng *et al.*, 2009, Hsiao *et al.*, 2009). These parameters are applicable to a range of climatic conditions and do not depend on the variety or hybrid used in the experiments of Heng *et al.* (2009) and Hsiao *et al.* (2009).

Data analysis and simulated treatments

Calibration is a fine adjustment of certain model parameters to obtain high correlation between experimental and simulated values (Hussein *et al.*, 2011). After calibrating the AquaCrop model with the experiment of Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), validation was done by statistical analysis of data of yield, biomass and duration of the cycle of real crops and those simulated with parameters already calibrated, with conservative or constant parameters and with the input parameters required by the AquaCrop model. The root mean square error (*RMSE*) was used and the index of agreement (*d*) of Willmott according to Willmott (1982), and were calculated with the following equations:

$$RMSE = \sqrt{1/(n) \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

where S_i and O_i are the simulated and observed values, n is the number of observations, \bar{O}_i is the mean of values of O_i .

According to Heng *et al.* (2009) it is feasible to use the above equations because: the *RMSE* (equation 8) represents an overall measure between observed and simulated values, that is, an indicator of uncertainty, due to the fact that it takes the same units of the simulated variable, and, therefore,

el riego, el contenido de humedad del suelo llega a capacidad de campo (42 % de humedad volumétrica); 2) riego deficitario (80 % respecto a *RT*); 3) riego deficitario (60 % con respecto del *RT*). La profundidad radicular efectiva de exploración por el cultivo de maíz durante su ciclo fenológico se consideró de 1 m (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006); aunque Heng *et al.* (2009) y Hsiao *et al.* (2009) reportan 1.5 m. En los escenarios de disponibilidad hídrica simulados se consideró la misma densidad de población para cada fecha de siembra de cada ciclo agrícola (110 000 para O-I y 95 000 para P-V), mismas características edáficas de las parcelas y clima de la región obtenido de la red de estaciones meteorológicas del DR-075.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros calibrados del modelo AquaCrop fueron los de entrada (densidad de población, productividad del agua, índice de cosecha, temperaturas umbrales, método para calcular los grados día y expansión inicial del dosel vegetal) del experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). Se validó con datos de las parcelas comerciales de maíz de los ciclos agrícolas O-I y P-V posteriores y sus variedades, densidades de población y condiciones de manejo hídrico (Cuadro 2).

Los resultados indican que las predicciones del rendimiento de grano del modelo fueron buenas ($RMSE=0.79 \text{ t ha}^{-1}$ y $d=0.85$; Cuadro 3).

Rendimientos simulados y desarrollo del dosel vegetal para maíz

Las simulaciones en condiciones diferentes de disponibilidad hídrica, para obtener los rendimientos de maíz, respecto a la densidad de población, fechas de

the value closer to zero indicates a good performance in the simulation. The value d (equation 9) ranges from 0 to 1.0 and in both analyses they were sequentially applied to observed and simulated data.

Simulated treatments of corn growth were performed estimating irrigation requirements for different sowing dates and yield of grain and biomass (in dry matter) in the furrow irrigation system, with the following conditions of water availability of soil: 1) total irrigation (*RT*) without water restriction because after irrigation, soil moisture content reaches field capacity (42 % volumetric moisture); 2) irrigation deficit (80 % with respect to *RT*); 3) irrigation deficit (60 % with respect to *RT*). The effective rooting depth exploration by the corn crop during its phenological cycle was considered 1 m (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006), although Heng *et al.* (2009) and Hsiao *et al.* (2009) report 1.5 m. In the simulated water availability scenarios the same population density was considered for each sowing date of each agricultural season (110 000 for O-I and 95 000 for P-V), same soil characteristics of the plots and climate of the region obtained from the network of weather stations of the DR-075.

RESULTS AND DISCUSSION

The calibrated parameters of the AquaCrop model were those of the input (population density, water productivity, harvest index, threshold temperatures, method to calculate the degree days and initial expansion of green canopy) of the experiment of Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). It was validated with data of commercial corn plots of the agricultural seasons O-I and subsequent P-V and their varieties, population densities and water management conditions (Table 2).

Cuadro 3. Resultados obtenidos en campo y simulados con el modelo AquaCrop.
Table 3. Results obtained in the field and simulated with the AquaCrop model.

Parcela	Resultados obtenidos en campo				Simulación con el modelo AquaCrop			
	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (t ha^{-1})	Rend. [†] (t ha^{-1})	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (t ha^{-1})	Rend. [†] (t ha^{-1})
Exp.	179	1451.1	26.2	10.7	168	1814	26.6	10.87
07-08	177	1648	20.9	10.0	149	1887	24.2	11.6
08-09	181	1682	25.1	12.0	154	1967	25.3	12.1
2008	135	1199	22.4	9.6	127	1820	23.8	10.2
2009	133	1175	18.8	9.0	117	1648	19.6	9.4

[†] Rend.=rendimiento; Exp.=experimental.

siembra en los ciclos agrícolas O-I y P-V, se realizaron considerando los datos agronómicos de calibración y validación (Figura 2). De acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2011), el rendimiento promedio de maíz para la agricultura con riego en el norte de Sinaloa está en el intervalo simulado por el modelo Aqua-Crop. Pero faltan acciones para mejorar la productividad del cultivo y alcanzar un rendimiento superior como el simulado con la condición de disponibilidad hídrica de riego total (*RT*).

La cantidad de biomasa generada durante su ciclo de crecimiento es una característica que define la producción, porque define el trabajo de la planta para producir su alimento y la producción final. El desarrollo del dosel vegetal simulado con el modelo AquaCrop para una fecha de siembra (05 de noviembre) en condiciones diferentes de disponibilidad hídrica, en el ciclo agrícola O-I y P-V generaron diferencias en dependencia de las condiciones hídricas (Figura 3).

Estimación de los requerimientos hídricos con respecto a la fecha de siembra

También se simularon los requerimientos hídricos del maíz para condiciones de disponibilidad hídrica diferentes en distintas fechas de siembra, durante los ciclos agrícolas (O-I y P-V) típicos para el cultivo de maíz (Cuadro 4).

Duración del ciclo del cultivo simulado

Los resultados de la duración del ciclo del cultivo de maíz (Figura 4) mostraron que el modelo tiene

The results indicate that predictions of grain yield of model were good ($RMSE=0.79 \text{ t ha}^{-1}$ and $d=0.85$; Table 3).

Simulated yields and development of the green canopy for corn

Simulations under different conditions of water availability, to obtain corn yields, as regards to population density, sowing dates in the agricultural seasons O-I and P-V were performed considering agronomic data of calibration and validation (Figure 2). According to Ojeda-Bustamante *et al.* (2011), the average corn yield for irrigated agriculture in northern Sinaloa is in the interval simulated by the Aqua-Crop. However, actions are missing to improve crop productivity and achieve higher performance as the simulated with the condition of water availability of total irrigation (*RT*).

The amount of biomass generated during its growth cycle is a characteristic that define production, because it defines the work of the plant to produce its food and final production. The development of the green canopy simulated with the AquaCrop model for a sowing date (November 5) in different conditions of water availability in the agricultural season O-I and P-V generated differences depending on water conditions (Figure 3).

Estimation of water requirements with respect to sowing date

Also corn crop water requirements were simulated for different water availability conditions in different

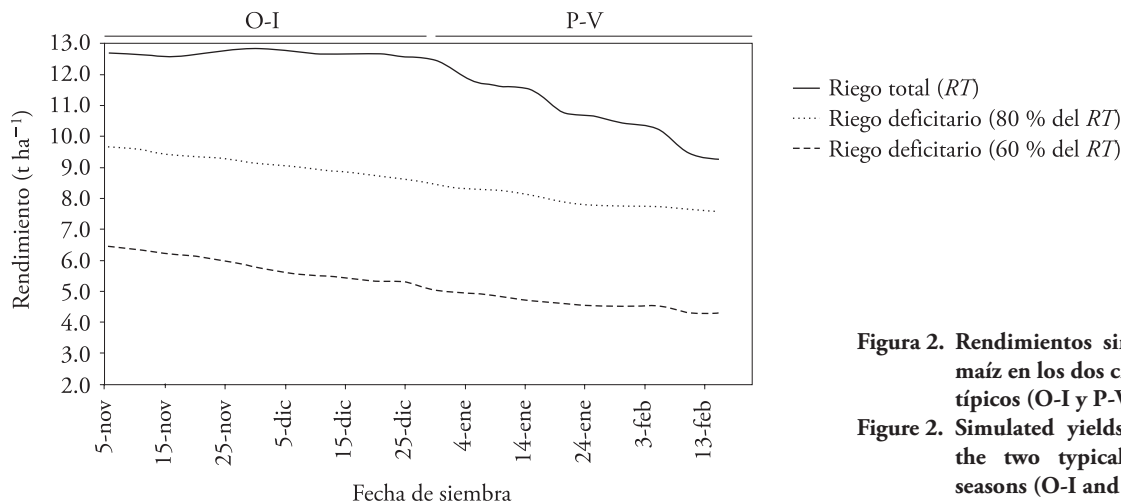


Figura 2. Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (O-I y P-V).

Figure 2. Simulated yields for corn in the two typical agricultural seasons (O-I and P-V).

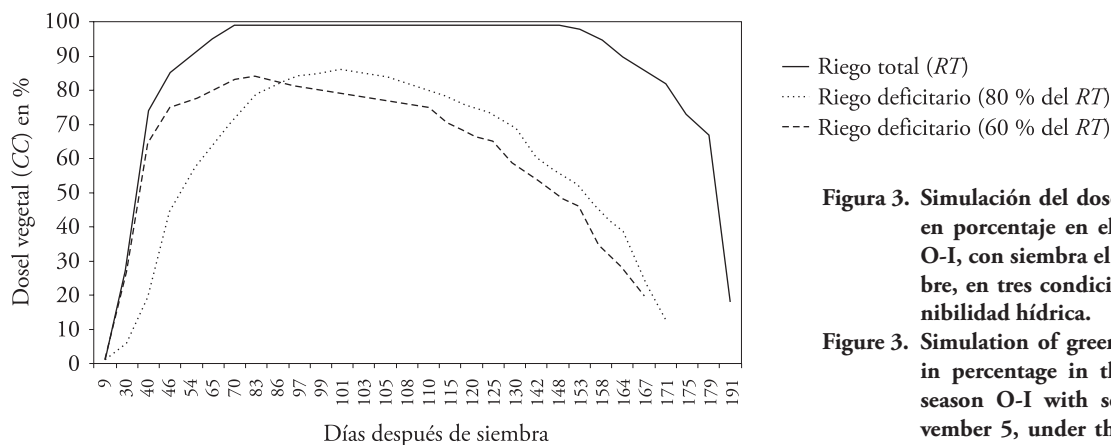


Figura 3. Simulación del dosel vegetal (CC) en porcentaje en el ciclo agrícola O-I, con siembra el 05 de noviembre, en tres condiciones de disponibilidad hídrica.

Figure 3. Simulation of green canopy (CC) in percentage in the agricultural season O-I with sowing on November 5, under three conditions of water availability.

precisión alta para simular el crecimiento del cultivo en condiciones de disponibilidad de agua y fechas de siembra diferentes. Esto genera certidumbre para las condiciones climáticas contrastantes en la zona norte de Sinaloa. Según los resultados de campo, la duración del ciclo es menor que los simulados porque se consideró el clima promedio de la zona pero no las simulaciones de estrés térmico y fertilización, lo que genera condiciones propicias para el ciclo del cultivo, aunque se reduce aquél del período de siembra más caliente.

Para usar el modelo AquaCrop se requiere la calibración de los parámetros de entrada, pues ya se definieron las T_{c-min} y T_{c-max} de 10 a 30 °C y sólo se usaron cuatro de las variedades más utilizadas en la

planting dates during the typical agricultural seasons (O-I and P-V) for growing corn (Table 4).

Duration of the simulated crop cycle

The results of the duration of the corn crop cycle (Figure 4) showed that the model has high accuracy to simulate crop growth in conditions of water availability and different sowing dates. This creates certainty for contrasting climatic conditions in northern Sinaloa. According to the field results, the duration of the cycle is less than those simulated because average weather of the area was considered but not thermal stress simulations and fertilization, which creates favorable conditions for the crop cycle,

Cuadro 4. Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos O-I y P-V en condiciones diferentes de disponibilidad hídrica y fecha de siembra.

Table 4. Water requirements of corn for seasons O-I and P-V under different conditions of water availability and sowing date.

Fecha de siembra	Riego total (RT)	Riego deficitario (80 % del RT)	Riego deficitario (60 % del RT)
	mm		
05-nov	482.3	436.8	373.3
15-nov	471.1	441.6	379.9
30-nov	473.1	444.7	384.0
05-dic	474.2	432.5	375.1
15-dic	474.4	427.2	371.5
30-dic	463.1	419.4	364.0
05-ene	494.0	449.0	397.4
15-ene	481.2	435.2	378.0
30-ene	474.5	429.7	374.3
05-feb	439.9	390.9	336.5
15-feb	410.3	360.6	318.0

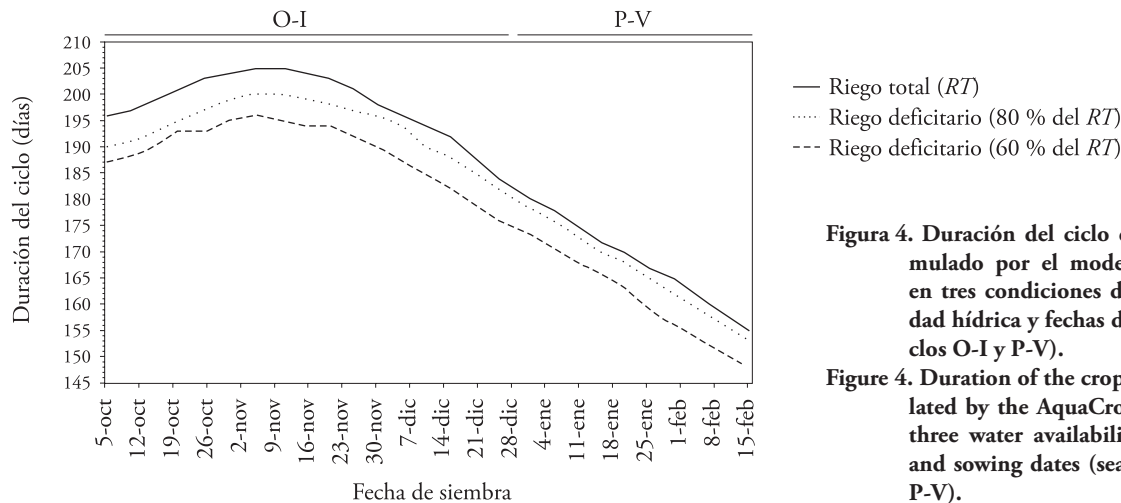


Figura 4. Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop en tres condiciones de disponibilidad hídrica y fechas de siembra (ciclos O-I y P-V).

Figure 4. Duration of the crop season simulated by the AquaCrop model into three water availability conditions and sowing dates (seasons O-I and P-V).

zona de estudio para diferentes ciclos agrícolas; por tanto, se requieren los datos de otras variedades. De acuerdo con las simulaciones realizadas por el modelo, el período óptimo para el ciclo del cultivo y los rendimientos es del 5 de noviembre al 15 de enero. Los análisis estadísticos mostraron el alto desempeño del modelo para las condiciones predominantes del norte de Sinaloa, por lo que podría aplicarse a otras regiones maiceras del estado y del país para ofrecer alternativas de manejo a los productores y mejorar la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

Con el modelo AquaCrop fue posible simular el rendimiento de la zona con una correlación alta del *RSME* y *d*, pues las simulaciones están cerca de los valores observados en campo. De acuerdo con los escenarios de disponibilidad hídrica, hay un impacto en el dosel vegetal por estrés hídrico del cultivo. El modelo AquaCrop es una herramienta que se puede utilizar para evaluar escenarios de estrés hídrico, requerimientos de riego, el impacto de diferentes condiciones de manejo agronómico y estimar rendimientos dependientes de las condiciones climáticas de la región.

LITERATURA CITADA

Cavero, J., I. Farre, P. Debaeke, and J. M. Faci. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92: 679-690.
 CONAGUA. 2012. Base de datos de las estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Gerencia de distritos de riego. México, D.F.

although it reduces that one of the hottest planting period.

To use the AquaCrop model calibration of the input parameters is required, since the T_{c-min} and T_{c-max} of 10 to 30 °C are already defined and only four of the most used varieties were utilized in the study area for different agricultural seasons; therefore, data from other varieties are required. According to the model simulations, the optimal period for the crop cycle and yields is from November 5 to January 15. Statistical analyses showed the high performance of the model for the prevailing conditions of northern Sinaloa, so it could be applied to other corn growing regions of the State and the country to offer management alternatives for producers and improve decision-making.

CONCLUSIONS

With the AquaCrop model was possible to simulate performance of the area with a high correlation of *RSME* and *d*, as the simulations are close to those observed in the field. According to water availability scenarios, there is an impact on the green canopy by water stress of the crop. The AquaCrop model is a tool that can be used to assess water stress scenarios, irrigation requirements, the impact of different agronomic conditions and estimate yields depending on the climatic conditions of the region.

—End of the English version—



- Doorenbos, J., and A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage. Paper no. 33. FAO, Italy. 193 p.
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Mejía-Sáenz, y E. Sifuentes-Ibarra. 2012. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoam.* 30(1): 59-67.
- Heng, L. K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell, and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron. J.* 101(3): 488-498.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, C. H. Porter, K. J. Boote, L. A. Hunt, U. Singh, J. L. Lizaso, J. W. White, O. Uryasev, F. S. Royce, R. Ogoshi, A. J. Gijssman, G. Y. Tsuji, and J. Koo. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hsiao, T. C., L. K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101(3): 448-459.
- Hussein, F., M. Janat, and A. Yakoub. 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish J. Agric. Res.* 9(4): 1319-1330.
- Íñiguez-Covarrubias, M., W. Ojeda-Bustamante, y A. Rojano-Aguilar. 2011. Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Rev. FCA UNCuyo.* 43(2): 175-191.
- Jones, C. A., J. R. Kiniry, P. T. Dyke, D. B. Farmer, and D. C. Godwin. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station. 194 p.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman, and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18: 235-265.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn, and C. J. Smith. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18: 267-288.
- López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, y A. Rojano-Aguilar. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Rev. Chapingo Serie Hortic.* 11(2): 257-267.
- Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agron. J.* 88(5): 695-697.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40(1): 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., J. M. González-Camacho, E. Sifuentes-Ibarra, E. Isidro, and L. Rendón-Pimentel. 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agric. Water Manage.* 89: 81-88.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, M. Íñiguez-Covarrubias, y M. J. Montero-Martínez. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45(1): 1-11.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, A. Rojano-Aguilar, y M. Íñiguez-Covarrubias. 2012. Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. *In: Martínez-Austria, P. E., y C. Patiño-Gómez (eds). Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en México. Vol. IV. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua pp: 71-119.*
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres. 2009a. AquaCrop. Reference Manual. FAO, Rome, Italy. 218 p.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres. 2009b. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101(3): 438-447.
- SAGARPA. 2007. Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. 208 p.
- SIAP. 2012. Atlas agropecuario y pesquero: información del sector agroalimentario 2012. Sistema de información agroalimentaria y pesquera. SAGARPA. México. 154 p.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101(3): 426-437.
- Stöckle, C. O., M. Donatelli, and R. Nelson. 2003. CropSys, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289-307.
- Walker, W. R., and G. V. Skogerboe. 1987. Surface Irrigation "Theory and Practice". Prentice-Hall. Utah State University. Logan, UT, USA. 368 p.
- Wanjura, D. F., and D. R. Upchurch. 2000. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *Trans. ASAE* 43(4): 867-875.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 63(11): 1309-1313.
- Yang, H. S., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer, and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-Maize - a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Res.* 87: 131-154.