



Evaluación del rendimiento y la productividad del agua en soya (*Glycine max*) con AquaCrop*

Assessment of yield and water productivity in soybean (*Glycine max*) with AquaCrop

Dania Zúñiga-Herrera¹, Néstor Felipe Chaves-Barrantes², Marco Vinicio Gutiérrez-Soto³,
Mayela Monge-Muñoz¹, Cristina Chinchilla-Soto¹

* Recepción: 19 de mayo, 2025. Aceptación: 29 de julio, 2025. Parte del proyecto de investigación 802-B6-604 “Estimación de la eficiencia en el uso del agua (EUA) de una estrategia de mitigación-adaptación al cambio climático, para la alimentación de ganado de doble propósito en la zona norte de Costa Rica”, financiado por la Universidad de Costa Rica, Fondo de Estímulo para Reinserción.

¹ Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental. Montes de Oca, Costa Rica. daniah967@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0000-4881-4749>); mayela.monge@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-1176-1086>); cristina.chinchilla@ucr.ac.cr (autora para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0002-6507-0419>).

² Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Programa de Leguminosas. Alajuela, Costa Rica. nestor.chaves@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-8465-8130>).

³ Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Programa de Ecofisiología de Plantas Tropicales. Alajuela, Costa Rica. marcovgutierrez82@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-8264-0129>).

Resumen

Introducción. Los modelos de simulación son una herramienta para estudiar el comportamiento de los cultivos bajo distintas condiciones climáticas, hídricas y prácticas de manejo agronómico. **Objetivo.** Evaluar el modelo AquaCrop en la estimación del rendimiento y la productividad del agua en el cultivo de la soya variedad CIGRAS-06. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, en Alajuela, Costa Rica, del 6 de junio al 23 de octubre de 2018. Se utilizó el modelo AquaCrop v. 7.1 para simular el desarrollo y el rendimiento del cultivo de soya. Se compararon datos simulados de cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa y rendimiento con datos experimentales de una parcela sembrada con soya variedad CIGRAS-06. Se emplearon parámetros de suelo medidos en campo y generados mediante ecuaciones de pedotransferencia. **Resultados.** Las predicciones del rendimiento, la biomasa total y la cobertura fueron buenas (similitud: $d \geq 0,97$), pero las predicciones de cobertura foliar durante el inicio del ciclo del cultivo resultaron susceptibles de mejora. Las diferencias en los dos tipos de parámetros de suelo utilizados no afectaron significativamente la simulación final. **Conclusiones.** AquaCrop permitió simular de manera satisfactoria el rendimiento de la soya, la biomasa y la cobertura foliar. La simulación de la productividad del agua fue superior a otros valores reportados en la literatura.

Palabras clave: biomasa, cobertura de dosel, conductividad hidráulica, simulación, sensibilidad, uso consuntivo.



Abstract

Introduction. Simulation models are a tool to study crop behavior under different climatic and water conditions and agronomic management practices. **Objective.** To evaluate the AquaCrop model for estimating yield and water productivity in soybean var. CIGRAS-06. **Materials and methods.** The study was carried out at the Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno of the University of Costa Rica, in Alajuela, Costa Rica, from June 6 to October 23, 2018. The AquaCrop v. 7.1 model was used to simulate soybean crop development and yield. Simulated data on canopy cover, biomass production, and yield were compared with experimental data from a plot planted with soybean variety CIGRAS-06. Soil parameters measured in the field and generated with pedotransfer equations were used. **Results.** Predictions of yield, total biomass, and canopy cover were good (similarity values: $d \geq 0.97$), but predictions of leaf coverage during the early crop cycle were susceptible to improvement. Differences between the two types of soil parameters used did not significantly affect the final simulation. **Conclusions.** AquaCrop successfully simulated soybean yield, biomass, and leaf coverage. Water productivity simulation was higher than values reported in the literature.

Keywords: biomass, canopy cover, hydraulic conductivity, simulation, sensitivity, consumptive use.

Introducción

Se proyecta que el impacto del cambio climático en el sector agropecuario será negativo, debido a sequías prolongadas y alteraciones en los patrones de lluvia (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). Costa Rica, y en general toda Centroamérica, ha sido identificada dentro de los “puntos calientes” de cambio climático en el área tropical, con reducciones en la precipitación y aumentos de temperaturas mínimas de hasta 4 °C, particularmente en la zona norte del istmo centroamericano (Imbach et al., 2018). Esto conlleva serios impactos en la disponibilidad de agua y la seguridad alimentaria, con potenciales efectos negativos en la producción agropecuaria de Costa Rica (Quesada-Chacón et al., 2021; Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, 2016), en especial durante los años con influencia del fenómeno del Niño.

Con el objetivo de mejorar la gestión del agua en la agricultura, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) creó el modelo AquaCrop (Steduto et al., 2009), que simula el crecimiento, la productividad y el uso de agua de los cultivos (Salman et al., 2021). Este emplea parámetros de fácil adquisición en campo (datos climáticos, propiedades del cultivo y del suelo) para entender las interacciones clima-suelo y su efecto en la productividad del agua (PA). La PA o eficiencia en el uso del agua (rendimiento/agua utilizada) es una característica integradora que permite evaluar la respuesta de los agroecosistemas al entorno (Steduto et al., 2012; Yadav et al., 2024).

Cultivos como algodón (*Gossypium* spp.), papa (*Solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*), arroz (*Oryza sativa*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), trigo (*Triticum* spp.), tomate (*Solanum lycopersicum*) y soya (*Glycine max*) cuentan con una calibración robusta en AquaCrop, respaldada con datos provenientes de múltiples ensayos bajo distintas condiciones de producción (Raes et al., 2023). Esto permite su uso de forma más confiable para procesos de validación en otras condiciones agroecológicas. En contraste, otros cultivos como el frijol común requieren una etapa previa de calibración y validación para ajustar parámetros específicos del modelo asociados al cultivo (Chinchilla Hidalgo, 2023; Raes et al., 2023).

La soya (*Glycine max* [L.] Merr.) se encuentra bien parametrizada en AquaCrop (Raes et al., 2023) con múltiples aplicaciones (Dos Santos Farias et al., 2024; Kreutz Rosa et al., 2023; Morales-Santos et al., 2023). Se trata de un cultivo oleaginoso y una leguminosa rica en proteína, del que se siembran aproximadamente 126 millones de ha y

se producen 366 millones de toneladas de grano (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], s. f.). Además, se espera que su producción ascienda un 0,9 % anual para alcanzar 415 millones de toneladas en el año 2032. En Latinoamérica, su rápido crecimiento, junto con las condiciones agroclimáticas, permite hasta dos ciclos anuales (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] & FAO, 2023).

En Costa Rica, el cultivo de soya (*Glycine max* [L.] Merr.) ha vuelto a captar la atención, impulsado por el impacto de diversos factores ambientales, sociales, económicos y geopolíticos, y su producción se ha planteado para disminuir la vulnerabilidad del sector agropecuario (Cordero, 2023). Desde 1990, el Centro de Investigación en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica (UCR) ha trabajado en la adaptación y mejoramiento de variedades de soya para condiciones tropicales (Villalobos & Camacho, 1999). Entre estas, destaca la variedad CIGRAS-06, la cual se desempeña bien bajo condiciones de estrés hídrico; además, su cosecha en etapa R6 representa una estrategia de nutrición animal eficiente (Tobía & Villalobos, 2004).

La utilización de modelos de simulación como AquaCrop podría resultar una herramienta valiosa para la toma de decisiones con miras al establecimiento de nuevas áreas de cultivo o la optimización de las existentes. Sin embargo, es necesario estimar la capacidad del modelo para generar información sobre las variedades locales. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el modelo AquaCrop en la estimación del rendimiento y la productividad del agua en el cultivo de la soya variedad CIGRAS-06.

Materiales y métodos

Sitio experimental

La investigación se realizó de junio a octubre de 2018 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM) de la UCR (10°00'25"N, -84°15'34"O) a 849 m s. n. m., en la provincia de Alajuela, Costa Rica. La EEAFBM se ubica dentro de la zona de vida del bosque premontano subhúmedo caliente, con una estación seca bien definida de diciembre a abril. La precipitación anual promedio es de 1939,6 mm, la temperatura promedio del aire es cercana a los 22 °C, la humedad relativa promedio es de 78 % y la evaporación promedio es de 1875,9 mm (Gutiérrez et al., 1997).

El suelo de la zona experimental se clasifica dentro del orden de los Inceptisoles y en el suborden Ustepts (Mata et al., 2016). Se caracteriza por ser un suelo joven, de alta fertilidad, con texturas franco-arenosas o franco-arcillosas, con régimen de humedad ústico y buen drenaje (Soil Survey Staff, 2014). Además, no presentó problemas de fertilidad ni acidez según el análisis químico realizado a la siembra.

Componentes del modelo AquaCrop

AquaCrop v. 7.1 es un modelo dinámico que considera el sistema suelo-planta-atmósfera como un continuo para simular el rendimiento potencial de los cultivos herbáceos. Los parámetros mínimos de entrada son los componentes del clima (temperatura, precipitación, demanda de evaporación y concentración de CO₂), del cultivo (días después de la siembra para alcanzar la floración, la madurez fisiológica y la senescencia) y del suelo (parámetros físicos que determinan el flujo de agua en el suelo: conductividad hidráulica, contenido de humedad a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y saturación). Adicionalmente, se pueden considerar aspectos de manejo como riego, control de malezas y fertilización (Steduto et al., 2012).

En el flujo de trabajo se distinguen dos fases: la calibración, en la cual se generan simulaciones, se comparan con los datos de campo y se modifican los parámetros para mejorar el ajuste entre valores simulados y reales; y la validación/evaluación, en la que se realizan simulaciones y se comparan los datos obtenidos con valores reales sin

ajustes adicionales para evaluar su desempeño. El modelo posee parámetros conservativos (permanecen constantes bajo diferentes condiciones de crecimiento y regímenes hídricos), y no conservativos (dependen de la ubicación, la variedad del cultivo y prácticas de manejo, entre otros) (Steduto et al., 2009), los cuales se modificaron como parte de esta investigación.

Características climáticas

Se utilizaron datos climáticos de 1995 a 2018, de la estación meteorológica localizada en la EEAFBM incluyendo datos diarios de temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y precipitación (mm). La evapotranspiración potencial (ET_o) se calculó con la ecuación Penman-Monteith y se usaron los valores de dióxido de carbono incluidos en AquaCrop, provenientes del Observatorio Mauna Loa (Hawaii, USA). Los datos faltantes en la serie climática se completaron según Ureña et al. (2016) con estaciones meteorológicas cercanas. El periodo de simulación (6 de junio al 23 de octubre de 2018) se caracterizó por una temperatura promedio de 24,4 ± 1,15 °C, una humedad relativa promedio de 69,68 ± 6,43 % y una precipitación acumulada de 782 mm.

Parámetros de suelo

Para la caracterización edáfica, se realizó una calicata (1 × 0,50 m) y se tomaron muestras a cuatro profundidades (0-0,05; 0,05-0,30; 0,30-0,35 y 0,35-0,50 m). La textura se determinó según el método de Bouyoucos (Day, 1965); el contenido de agua a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) por el método de ollas de presión (Forsythe, 1985), y el contenido de materia orgánica (MO) por combustión seca en un analizador elemental basado en el principio de Dumas. El contenido de humedad a 5 cm de profundidad se determinó semanalmente con un sensor de capacitancia con valores promedios de 28,08 ± 8,0 %, inferiores a 20 % en junio-julio y superiores a 40 % en octubre.

Se utilizó la ecuación de pedotransferencia (Van Looy et al., 2017) de Saxton y Rawls (2006) incluida en la calculadora de características de agua del suelo (SWCH, por sus siglas en inglés), para generar los valores de CC, PMP, conductividad hidráulica (CH) y contenido de humedad a saturación (SAT), con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo cuando se emplean datos obtenidos por medio de este tipo de ecuaciones y compararlos con los de campo. Debido a que la CH y el valor de SAT no se pudieron evaluar en campo, se usaron los valores de esta ecuación para completar el conjunto de datos de campo, denominado C_SWCH.

Cultivo y determinación del crecimiento del cultivo

Se utilizó la soya variedad CIGRAS-06, la cual se estableció en una parcela de 920 m² con una densidad de 8,33 plantas/m² (0,80 × 0,15 m). La semilla se inoculó con *Rhizobium* sp. Se fertilizó a la siembra con la fórmula comercial 10-30-10 (N, P, K) a una dosis de 200 kg/ha. La cobertura del dosel (CD) se estimó con la ecuación 1, desarrollada para soya y maíz por Steduto et al. (2012). El índice de área foliar (IAF) se midió bisemanalmente con un ceptómetro en cinco puntos al azar en la parcela.

$$CD = 1,005[1 - \exp(-0,6 IAF)]^{1,2} \quad (1)$$

Donde *CD* es la cobertura del dosel e *IAF* es el índice de área foliar.

Determinación de la biomasa y rendimiento

Los muestreos de biomasa aérea se realizaron los días 20, 28, 35, 42, 50, 63, 72, 79, 92 y 140 después de la siembra. Se tomaron 7-8 plantas (1 m²) en cinco puntos y se determinó el peso fresco y seco (en estufa a 105 °C por 48 h). El rendimiento se evaluó mediante el muestreo de 1 m² en cinco puntos. Las vainas se separaron de la planta y se extrajo el grano pesado a 12 % de humedad. La soya experimenta pérdida del follaje cuando llega a la madurez fisiológica, por lo que el valor de la biomasa final se calculó sumando el rendimiento (peso seco del grano) al peso de la biomasa seca del día 90.

Evaluación del modelo

Para la evaluación del modelo AquaCrop V.7.1 se modificó el archivo de soya que proporciona por defecto el modelo en función de las características del cultivar CIGRAS-06, y se ajustaron los parámetros no conservativos (Cuadro 1) del ciclo del cultivo y su fenología. La evaluación de los resultados de la simulación se realizó hasta lograr el mejor ajuste posible entre los valores simulados y los datos medidos en campo. Para la revisión del ajuste se utilizó una combinación de indicadores estadísticos (Cuadro 2), la cual es más robusta (Porrás-Jorge et al., 2020) que un solo indicador, debido a las limitaciones de cada parámetro.

Cuadro 1. Parámetros del cultivo de soya utilizados para la evaluación y calibración del modelo AquaCrop. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Table 1. Soybean crop parameters used for the evaluation and calibration of the AquaCrop model. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Parámetro	Valor	Tipo de parámetro
Tipo de siembra	Directa	No conservativo
Densidad de las plantas (plantas/ha)	83 300	No conservativo
Distancia de siembra (m)	0,80 × 0,15	No conservativo
Emergencia (dds)	5	No conservativo
Floración (dds)	72	No conservativo
Máxima cobertura del dosel (dds)	92	No conservativo
Duración de la floración (dds)	63	No conservativo
Coficiente de cobertura del dosel inicial (%)	0,42	Conservativo
Coficiente de máxima cobertura del dosel (%)	0,98	Conservativo
Índice de cosecha de referencia (%)	40	Conservativo
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	15	Conservativo

dds: Días después de la siembra. / **dds:** Days after sowing.

Cuadro 2. Valores recomendados para la eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF), el índice de Willmott o similitud (d), la raíz del cuadrado medio del error normalizado (NRMSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

Table 2. Recommended values for Nash-Sutcliffe Efficiency (EF), the Willmott index or similarity (d), the normalized root mean square error (NRMSE) and the coefficient of determination (R^2).

Evaluación del desempeño	EF	d	NRMSE	R^2
Muy bueno	0,75-1,00	d >0 ,90	Cercano a 0	$R^2 > 0,9$
Bueno	0,65-0,75	0,80-0,89		0,80-0,89
Satisfactorio	0,50-0,65	0,50-0,79		0,5-0,79
Insatisfactorio	EF < 0,50	d < 0,50		$R^2 < 0,05$
Aplicación y consideraciones	Para determinar la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de las observaciones (Tornés Olivera et al., 2016).	Valores relativamente altos pueden ser obtenidos aun cuando el modelo funciona mal y todavía es muy sensible a sobre o subestimación (Terán-Chaves, 2022).	Representa la medida global entre los valores observados y simulados, por lo que se considera un indicador de incertidumbre (Terán-Chaves, 2022).	Resultante de correlacionar linealmente los valores simulados y los medidos; se ve afectado por el número de observaciones.

Adaptado de Porras-Jorge et al. (2020) y Raes et al. (2023). Los parámetros se calculan según las ecuaciones incluidas en esas referencias. / Adapted from Porras-Jorge et al. (2020) and Raes et al. (2023). Parameters are calculated according to the equations included in those references.

Resultados

Características del suelo

El suelo se catalogó como franco arcilloso con una densidad aparente (DA) alta (Cuadro 3) que aumentó con la profundidad, lo que coincide con la disminución de más del 50 % en la CH en los niveles inferiores del perfil

Cuadro 3. Contenido de partículas, clase textural y constantes hídricas del suelo obtenidas en campo y calculadas con el programa SWCH. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Table 3. Particle content, soil textural class and soil water constants obtained in the field and calculated with the SWCH program. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Profundidad (cm)	Datos de campo*						Datos generados con SWCH **				
	Arena %	Limo %	Arcilla %	MO %	PMP (vol. %)	CC (vol. %)	Densidad aparente (g/cm ³)	PMP (vol. %)	CC (vol. %)	CH (mm/ día)	SAT (%)
0-5	37	31	32	8,3	22	30	1,16	22	37	388,6	56,3
5-30	45	25	30	6,3	23	29	1,27	21	34	297,1	52,0
30-35	40	23	37	5,6	24	30	1,32	24	37	128,2	50,2

* Todos los horizontes fueron catalogados como franco arcillosos según los datos del laboratorio. ** Todos los horizontes fueron catalogados como franco arcillosos excepto el de 5-30 franco arcillo-arenoso según SWCH. **MO:** Materia orgánica. **Vol.:** Volumen de agua. **PMP:** Contenido de humedad al punto de marchitez permanente. **CC:** Contenido de humedad a capacidad de campo. **CH:** Conductividad hidráulica. **SAT:** Contenido de humedad a saturación. / * All horizons were classified as clay loam according to laboratory data. ** All horizons were classified as clay loam except for the 5-30 sandy clay loam according to SWCH. **MO:** Organic matter. **Vol.:** Water volume. **PMP:** Permanent wilting point moisture content. **CC:** Field capacity moisture content. **CH:** Hydraulic conductivity. **SAT:** Saturation moisture content.

de suelo reportada por el SWCH. En general, el SWCH presentó valores mayores (16 %) de contenido de agua a capacidad de campo (CC) en comparación con los datos de campo (C_SWCH), mientras que se mantuvo similar en el punto de marchitez permanente (Cuadro 3), con diferencias importantes en el agua útil entre C_SWCH ($6,6 \pm 1,5$ %) y SWCH ($13,6 \pm 1,5$ %).

Evaluación de la cobertura del dosel y la biomasa

El modelo subestimó la cobertura del dosel en 36 % con datos de suelo de C_SWCH y en 33 % para SWCH. La subestimación fue más evidente en las primeras etapas del desarrollo del cultivo (50 días después de la siembra) (Figura 1a). Hacia el final del ciclo, esta diferencia se redujo a 7 % con datos de C_SWCH y a 2 % con SWCH. Durante el ciclo de cultivo, la cobertura promedio estimada fue de 54 %, superior al 44,3 % simulado con C_SWCH y al 47 % con SWCH. Los parámetros estadísticos mostraron un buen ajuste (R^2 , d, EF > 0,89) (Cuadro 4). Sin embargo, los valores del RMSE y del NRMSE fueron superiores al 10 %, por lo que resultaron susceptibles de mejora.

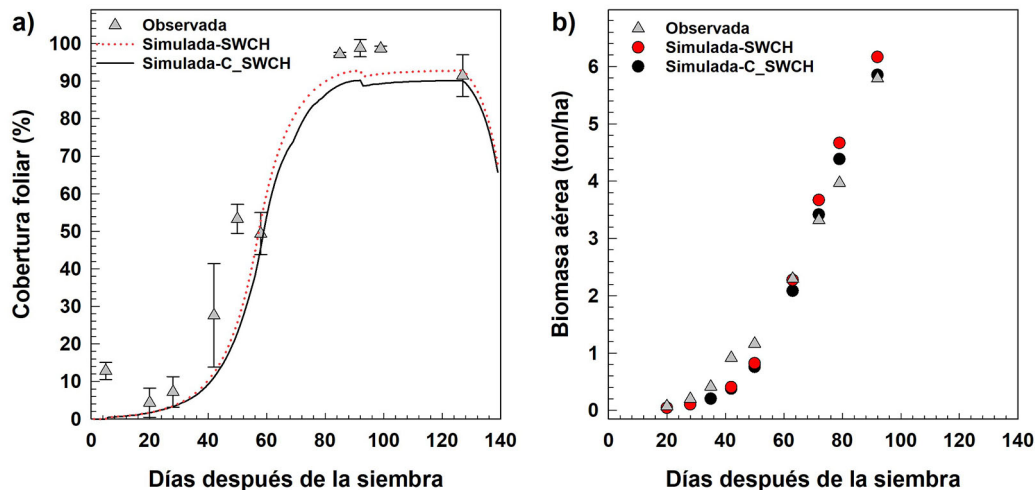


Figura 1. Valores medidos y simulados con AquaCrop para a) cobertura del dosel y b) biomasa de soya var. CIGRAS-06 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Junio a octubre de 2018.

Los datos simulados se obtuvieron con diferentes valores para el suelo, utilizando datos generados con la calculadora de propiedades de agua del suelo (SWCH) o datos de campo y SWCH (C_SWCH).

Figure 1. Measured and simulated values with AquaCrop for a) canopy cover and b) biomass of soybean var. CIGRAS-06 at the Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. June to October 2018.

Simulated data were obtained with different soil values, using data generated with the soil water properties calculator (SWCH) or field data and SWCH (C_SWCH).

El modelo simuló adecuadamente el comportamiento del desarrollo de la biomasa en campo hasta el día 90 (Figura 1b). Después de ese día no se cuenta con datos de biomasa para la comprobación adicional debido a la pérdida de parte de las muestras de la validación. Los valores promedio para el ciclo de biomasa simulados para C_SWCH ($2,03 \text{ t ha}^{-1}$) y los de SWCH ($2,04 \text{ t ha}^{-1}$) fueron cercanos a los observados ($2,14 \text{ t ha}^{-1}$). Los parámetros de desempeño (Cuadro 4) fueron muy buenos para EF, R2 y d, con valores superiores a 0,95 y un RMSE bastante bajo.

Cuadro 4. Indicadores estadísticos para la simulación de la cobertura del dosel y la biomasa. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Table 4. Statistical indicators for the simulation of canopy cover and biomass. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2018.

Método	R ²	RMSE (%)	NRMSE (%)	EF	d	Promedio observado*	Promedio simulado
Parámetros para cobertura foliar						Cobertura foliar (%)	
C_SWCH	0,98	12,70	23,60	0,89	0,97	54	44,3
SWCH	0,98	11,40	21,10	0,91	0,98	54	47,0
Parámetros para biomasa (t ha ⁻¹)						Biomasa (t ha ⁻¹)	
C_SWCH	0,99	0,3	14,1	0,96	0,99	2,01	2,03
SWCH	0,99	0,4	17,9	0,96	0,99	2,01	2,04

Los datos simulados se obtuvieron con diferentes valores para el suelo, utilizando datos generados con la calculadora de propiedades de agua del suelo (SWCH) o la combinación de datos de campo y SWCH (C_SWCH) ($n = 10$). * El promedio observado es calculado por el modelo a partir de los datos introducidos para la estimación de desempeño. **R²**: Coeficiente de determinación. **RMSE**: Raíz del error cuadrático medio. **NRMSE**: Raíz del error cuadrático medio normalizada. **EF**: Eficiencia de Nash-Sutcliffe. d: Índice de Willmott o similitud. / Simulated data were obtained with different soil values, using data generated with the Soil Water Properties Calculator (SWCH) or the combination of field and SWCH data (C_SWCH) ($n = 10$). * The observed average is calculated by the model from the input data for performance estimation. **R²**: Coefficient of determination. **RMSE**: Root mean square error. **NRMSE**: Normalized root mean square error. **EF**: Nash-Sutcliffe efficiency. d: Willmott index or similarity.

Rendimiento y productividad del agua

El cultivo tuvo un rendimiento en peso seco de $3,88 \pm 0,69$ t ha⁻¹, cercano a los valores simulados de 4,15 t ha⁻¹ para C_SWCH y de 4,19 t ha⁻¹ para SWCH. Los valores de biomasa observados de $9,67 \pm 2,05$ t ha⁻¹ también fueron próximos a los valores máximos simulados de 10,25 t ha⁻¹ para C_SWCH y 10,63 t ha⁻¹ para SWCH. En ambas simulaciones, la productividad del agua o eficiencia en su uso (kg de rendimiento por m³ de agua transpirada) fue de 0,63, con una leve diferencia en el agua transpirada de 428,0 mm para C_SWCH y 441,7 mm para SWCH.

Discusión

El rendimiento obtenido de $3,88 \pm 0,69$ t ha⁻¹ es cercano a valores reportados para soya en otras áreas de Costa Rica (3,91-4,8 t ha⁻¹) (Tobía & Villalobos, 2004; Villalobos & Camacho, 1999). El modelo AquaCrop v. 7.1 sobreestimó el rendimiento del cultivo cerca de un 7 %, pero el valor estuvo dentro de la desviación estándar de los datos de campo. Los resultados coinciden con estudios realizados en Brasil, donde el modelo fue utilizado con éxito en 19 cosechas con un rendimiento simulado de 3,97 t ha⁻¹ y $R^2 > 0,97$, pero con una subestimación generalizada (Kreutz Rosa et al., 2023).

Aunque las diferencias en el agua útil del suelo (entre CC y PMP, Cuadro 3) entre los escenarios simulados superan el 50 % entre SWCH ($13,6 \pm 1,5$ %) y C_SWCH ($6,6 \pm 1,5$ %), esta variación solo representó un 1 %. Esto puede estar asociado a que el ensayo se llevó a cabo en época lluviosa (agua del suelo no limitante). Las salidas del modelo mostraron una afectación del 6 % en el desarrollo del dosel para C_SWCH durante la floración, pero no se observaron periodos prolongados de estrés hídrico que causaran cierre estomático.

El impacto de los datos de suelo en las simulaciones no constituye un análisis de sensibilidad completo, ya que es un caso puntual y no considera la variación temporal de la precipitación (Lu et al., 2021). Sin embargo, es un aspecto relevante que merece exploración. El uso de ecuaciones de pedotransferencia, pese a sus limitaciones (Van Looy et al., 2017), podría disminuir costos en análisis. En AquaCrop, los parámetros que afectan la disponibilidad hídrica y el rendimiento del cultivo son los más sensibles (González-Robaina et al., 2019), pero se ha señalado que versiones posteriores a la 6.0 son menos sensibles a las incertidumbres en las propiedades del suelo (Lu et al., 2021).

La predicción global del modelo para rendimiento y biomasa total se consideró satisfactoria durante el desarrollo del cultivo, a pesar de que el modelo subestima el porcentaje de cobertura foliar (CF) globalmente en un 10 % y la biomasa en un 1,2 %, (Cuadro 4) independientemente de los parámetros de suelo (Figura 1a). Los índices utilizados para evaluar similitud entre los patrones de progresión fueron $\geq 0,97$, resultados semejantes a los obtenidos por González-Robaina et al. (2019) para la variedad de soya G-7R-315 en Cuba, donde las predicciones de biomasa fueron buenas (RMSE = 0,79 t ha⁻¹, EF = 0,88 y d = 0,98), mientras que la cobertura vegetal fue sobreestimada durante todo el ciclo.

El patrón presentado en la Figura 1a es de los más comunes, en el cual la CF simulada difiere de la medida real desde la emergencia hasta alcanzar el máximo. Al respecto, Steduto et al. (2012) sugirieron que la simulación podría mejorarse alterando el tamaño de la plántula inicial o la densidad de siembra, aunque esto no afectó la simulación actual. Otra posible causa es el uso de datos de cobertura foliar generados con la ecuación 1, que fue ajustada para maíz y soya, pero subestima la CF, especialmente a valores bajos de IAF (Steduto et al., 2012). Por ello, sería recomendable implementar otros métodos, como fotografías o tomar más valores de IAF en el inicio del crecimiento.

Las diferencias en el patrón de la biomasa pudieron deberse a que el modelo no puede explicar ciertos procesos ambientales (variaciones de temperatura, humedad) ni fisiológicos que ocurren en la planta (Tornés Olivera et al., 2016). En una simulación con quinoa (*Chenopodium quinoa*) también se observó una ligera sobreestimación de la biomasa final, atribuida a la falta de cuantificación de los descensos de la productividad del agua (Fajardo et al., 2016), tal como fue reportado por Dos Santos Farias et al. (2024) en soya. En el caso particular de la variedad CIGRAS-06, su clasificación como semi-indeterminada (Villalobos & Camacho, 1999) podría inferir en el patrón observado, pues el modelo la consideró como indeterminada (Figura 1b). No obstante, para confirmar esto se requieren ensayos adicionales.

Los valores de evapotranspiración (ET) obtenidos para la variedad CIGRAS-06 (656 mm) coinciden con el rango mundial (300-800 mm) según Steduto et al. (2012). Sin embargo, los valores de productividad del agua de 0,63 kg m⁻³ fueron superiores a los reportados por Boligon Minuzzi et al. (2017) en Brasil (0,58-0,60 kg m⁻³), lo cual concuerda con su capacidad para tolerar estrés hídrico (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2015). En este ensayo se observó una mayor cantidad de agua transpirada en el modelo con datos de SWCH (441,7 mm) en comparación con C_SWCH (428 mm), lo que se relaciona con las variaciones en el agua útil que generan las características del suelo.

Conclusiones

El modelo AquaCrop simuló de forma satisfactoria el rendimiento y la biomasa del cultivo de soya variedad CIGRAS-06 en la época lluviosa. La subestimación del desarrollo del dosel debe mejorarse. La productividad del agua resultó mayor a la reportada en otros sitios y se observaron diferencias asociadas a la disponibilidad de agua en el suelo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la UCR por el financiamiento mediante el proyecto 802-B6-604, Fondo de Estímulo, a la autora Cristina Chinchilla-Soto. Se agradece al personal

de la EEAFCBM, a la Dra. Adriana Murillo del CIGRAS y a la M. Sc. Ana Gabriela Pérez del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) por su colaboración en la reproducción de la soya para la obtención de semilla, así como a Cristian Porras, Luis Oreamuno y María José Gómez por su apoyo en labores de campo y en la toma de datos. Asimismo, se agradece al Instituto Meteorológico Nacional por los datos proporcionados por medio del convenio 325.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Boligon Minuzzi, R., Do Amaral Frederico, C., & Freire da Silva, T. G. (2017). Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for the Southern Brazil. *Revista Ceres*, 64(6), 567–573. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764060002>
- Chinchilla Hidalgo, K. (2023). *Validación del modelo AquaCrop para estimar el rendimiento de dos variedades comerciales de frijol común (Phaseolus vulgaris L.) bajo riego deficitario controlado* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI de la Universidad de Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/22237>
- Cordero, J. (2023, febrero 20). *Agricultores retoman el cultivo de soya en Guanacaste con semilla UCR*. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2023/2/20/agricultores-retoman-el-cultivo-de-soya-en-guanacaste-con-semilla-ucr.html>
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. In C. A. Black, D. D. Evans, D. D. Ensminger, J. L. White, & F. E. Clark (Eds). *Methods of soil analysis* (pp. 545–567). American Society of Agronomy. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c43>
- Dos Santos Farias, D. B., Neiva Rodrigues, L., & Alves Souza, S. (2024). AquaCrop model assessment for simulating soybean response under water stress. *Ciência Rural*, 54(5), Artículo e20230168. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230168>
- Fajardo, H., García, M., Raes, D., & Van Gaalen, H. (2016). Validación del modelo AquaCrop para diferentes niveles de fertilidad en el cultivo de Quinoa en el Altiplano Boliviano. *Revista CINTEX*, 21(2), 31–52. <https://revistas.pascualbravo.edu.co/index.php/cintex/article/view/16>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). *FAOSTAT: Database on crop yields*. Retrieved April 30, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Forsythe, W. (1985). *Manual de laboratorio: física de suelos*. (2.^a ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- González-Robaina, F., López-Vargas, D., Cisneros-Zayas, E., Herrera-Puebla, J., & Cid-Lazo, G. (2019). Calibración y análisis de sensibilidad del modelo AquaCrop para frijol en suelo Ferralítico Rojo Compactado. *Ingeniería Agrícola*, 9(4), 3–12. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1166>
- Gutiérrez, M. V., Soto, D., & Alpízar, M. (1997). Cuarenta años de observaciones meteorológicas en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno. *BOLTEC*, 30(2), 1-14.

- Imbach, P., Chou, S. C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., Siqueira, G., Silva, A., Garofolo, L., & Georgiou, S. (2018). Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLoS One*, 13(4), Artículo e0193570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193570>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Special report on climate change and land. Chapter 2: Land–climate interactions*. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2/>
- Kreutz Rosa, S. L., Moretti de Souza, J. L., De Oliveira, C. T., & Tsukahara, R. Y. (2023). Calibration and validation of the AquaCrop model to estimate soybean production in the Campos Gerais, Parana State, Brazil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 25(4), 1–13. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/8245>
- Lu, Y., Chibarabada, T. P., McCabe, M. F., De Lannoy, G. J. M., & Sheffield, J. (2021). Global sensitivity analysis of crop yield and transpiration from the FAO-AquaCrop model for dryland environments. *Field Crops Research*, 269, Artículo 108182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108182>
- Mata, R., Vázquez, A., Rosales, A., & Salazar, D. (2016). *Mapa digital de suelos de Costa Rica* (Escala, 1:200000). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). *Estrategia 2015-2034 y plan de acción para la ganadería baja en carbono en Costa Rica: síntesis informativa*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1174.pdf>
- Morales-Santos, A., García-Vila, M., & Nolz, R. (2023). Assessment of the impact of irrigation management on soybean yield and water productivity in a subhumid environment. *Agricultural Water Management*, 284, Artículo 108356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108356>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023–2032*. <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>
- Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W., & Ontiveros-Capurata, R. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 309–321. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Quesada-Chacón, D., Barfus, K., & Bernhofer, C. (2021). Climate change projections and extremes for Costa Rica using tailored predictors from CORDEX model output through statistical downscaling with artificial neural networks. *International Journal of Climatology*, 41(1), 211–232. <https://doi.org/10.1002/joc.6616>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2023). *AquaCrop: Version 7.1 reference manual* [Software Manual]. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Salman, M., García-Vila, M., Fereres, E., Raes, D. & Steduto, P. (2021). *The AquaCrop model – Enhancing crop water productivity. Ten years of development, dissemination and implementation 2009–2019* (FAO Water Report No. 47). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb7392en>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. (2016). *Plan Nacional para la Seguridad Alimentaria, Nutrición y Erradicación del Hambre 2025. Plan SAN-CELAC Costa Rica. I Quinquenio*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/cos177242.pdf>

- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la taxonomía de suelos* (12.^a ed.). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, & Servicio de Conservación de Recursos Naturales. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Terán-Chaves, C. A., García-Prats, A., & Polo-Murcia, S. M. (2022). Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Water*, 14(23), Artículo 3933. <https://doi.org/10.3390/w14233933>
- Tobía, C., & Villalobos, E. (2004). Producción y valor nutricional del forraje de soya en condiciones tropicales adversas. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 17–25. <https://doi.org/10.15517/rac.v28i1.61222>
- Tornés Olivera, N., Brown Manrique, O., Gómez Masjuan, Y., & Guerrero Alega, A. M. (2016). Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23–30. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/450>
- Ureña, P., Alfaro, E. J., & Soley, F. J. (2016). *Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía práctica de uso*. Universidad de Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/b05ba1d5-3f25-4c5a-85f3-4d93f802752e/content>
- Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., Montzka, C., Nemes, A., Pachepsky, Y. A., Padarian, J., Schaap, M. G., Tóth, B., Verhoef, A., Vanderborght, J., Van der Ploeg, M. J., Weihermüller, L., Zacharias, S., Zhang, Y., & Vereecken, H. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1199–1256. <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>
- Villalobos, E., & Camacho, F. (1999). Avances en el mejoramiento genético de la soya en Costa Rica: II. CIGRAS-06 y CIGRAS-10, dos nuevas variedades tropicales. *Agronomía Costarricense*, 23(1), 61–67.
- Yadav, M., Vashisht, B. B., Jalota, S. K., Jyolsna, T., Singh, S. P., Kumar, A., Kumar, A., & Singh, G. (2024). Improving water efficiencies in rural agriculture for sustainability of water resources: a review. *Water Resources Management*, 38(10), 3505–3526. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03836-6>