



SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE FRIJOL CULTIVADO BAJO TEMPORAL CON EL MODELO AQUACROP

SIMULATION OF GROWTH AND YIELD OF BEANS CULTIVATED UNDER RAINFED CONDITIONS WITH THE AQUACROP MODEL

Hilario Flores-Gallardo^{1,2*}, Héctor Flores-Magdaleno¹, Juan Enrique Rubiños-Panta¹, Jorge Víctor Prado-Hernández³, Nora Meraz-Maldonado⁴ y Roberto Ascencio-Hernández¹

¹Colegio de Postgraduados (COLPOS), Programa en Hidrociencias, Montecillo, Estado de México, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noreste, Río Bravo, Tamaulipas, México. ³Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. ⁴COLPOS, Programa en Fitosanidad-Entomología y Acarología, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (flores.hilario@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La agricultura desarrollada bajo condiciones de temporal (secano) cubre la mayor superficie a nivel mundial y en México; por lo tanto, se requiere la utilización de herramientas como los modelos para la simulación de cultivos, los cuales operan con datos climáticos, edáficos, fenología y manejo agronómico, permitiendo orientar a los productores agrícolas con asesoría técnica sobre el crecimiento, rendimiento esperado y potencial de un cultivo para un área agrícola específica. Actualmente, en México la utilización de modelos de simulación es limitada por la cantidad de parámetros necesarios y la información específica que se requiere obtener en campo de forma integral y veraz. El objetivo de la presente investigación fue parametrizar el modelo AquaCrop para modelar el rendimiento del cultivo de frijol pinto var. Centauro cultivado bajo condiciones de temporal en el estado de Durango, México, durante los ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) 2013 y 2014. Se compararon los datos observados y simulados para calibrar y validar el modelo utilizando información sobre la cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa y rendimiento de grano en la cosecha con datos experimentales de parcelas semi-comerciales ubicadas en los campos experimentales del INIFAP y se utilizaron parcelas comerciales de productores cooperantes establecidas en zonas representativas de Durango, México. Los resultados mostraron predicciones del rendimiento de grano de 0.18 t ha⁻¹ para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), un índice de Willmott (*d*) de 1.0, un coeficiente de determinación (*R*²) de 0.94, una desviación estándar (σ) de 0.10 y un coeficiente de variación (CV) de 0.11. El modelo AquaCrop es una alternativa viable con previa calibración y validación, para conocer el rendimiento esperado y potencial del cultivo de frijol producido bajo condiciones de temporal.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, calibración, secano, validación.

SUMMARY

Agriculture developed under rainfed conditions covers the largest area in the world and in Mexico; therefore, tools such as crop simulation models are required, which operate with climate, soil, phenology and agronomic management data, allowing to guide agricultural producers with technical advice on growth, expected and potential yield of the crop for a specific agricultural area. Currently, in Mexico the use of simulation models is limited by the number of parameters required and the specific information that needs to be obtained in the field in a comprehensive and truthful manner. The objective of this research was to parameterize the AquaCrop model to simulate the yield of the pinto bean cv. Centauro grown under rainfed

conditions in the state of Durango, Mexico, during the 2013 and 2014 Spring-Summer (S-S) agricultural seasons. Observed and simulated data were compared to calibrate and validate the model using information on canopy coverage, biomass production and grain yield at harvest with experimental data from semi-commercial plots located at INIFAP experiment stations and commercial plots of cooperating producers established in representative areas of Durango, Mexico. Results showed grain yield predictions of 0.18 t ha⁻¹ for the square root of the mean square error (RMSE), a Willmott index (*d*) of 1.0, a determination coefficient (*R*²) of 0.94, a standard deviation (σ) of 0.10 and a coefficient of variation (CV) of 0.11. The AquaCrop model is a viable alternative, with a previous calibration and validation, to know the expected and potential yield of the bean crop produced under rainfed conditions.

Index words: *Phaseolus vulgaris*, calibration, rainfed, validation.

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola bajo la modalidad de temporal (secano) tiene como principal limitante la susceptibilidad a la variabilidad climática, por su dependencia a variables como la precipitación, para satisfacer los requerimientos hídricos de las plantas, lo cual termina siendo insuficiente para el cultivo porque la precipitación que se registra en la mayor parte de la superficie cultivada bajo esa modalidad es escasa y errática (Flores-Gallardo *et al.*, 2014). Se considera a la escasez de agua como la mayor limitante para la producción agrícola, particularmente en las zonas áridas y semiáridas (Farooq *et al.*, 2017); sin embargo, el estrés ocasionado por la sequía es uno de los principales factores abióticos que representa una amenaza para la producción de los cultivos en todo el mundo debido a la afectación del desarrollo y rendimiento de las plantas (Siddiqui *et al.*, 2015). Por lo tanto, la sequía impide la productividad de las leguminosas de grano en todas sus etapas de crecimiento, debido específicamente a su ocurrencia durante las etapas reproductivas y en el desarrollo del grano (sequía terminal), considerándose mayormente crítica porque ocasiona una pérdida significativa del rendimiento (Farooq *et al.*, 2017).

La superficie cultivable en México es de 32.4 millones de

hectáreas, de las cuales 6.8 millones (21 %) corresponden a la modalidad de riego y el 79 % restante (25.6 millones de ha) a la modalidad de temporal (CONAGUA, 2022), aunque durante el año 2021 solamente se registraron 21.5 millones de ha cultivadas (SIAP, 2022a). El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) se cultiva y produce en todo el territorio nacional, con sus diferentes clases comerciales, principalmente con flor de mayo, negro, peruano y pinto, porque es uno de los principales cultivos alimenticios utilizados en la dieta poblacional por su alto contenido de proteínas, registrando 10 kg en promedio como consumo *per cápita* durante el último lustro (SIAP, 2020), lo cual permite generar beneficios económicos para los productores agrícolas (Borja-Bravo *et al.*, 2018). A nivel nacional, los principales productores de frijol son los estados de Zacatecas en la modalidad de temporal y Sinaloa en la modalidad de riego (SIAP, 2022b). El frijol presenta un bajo requerimiento hídrico, que oscila entre los 400 y 631 mm (Rosales-Serna *et al.*, 2016; Villordo-Pineda *et al.*, 2015) y también se considera como una especie resistente a la falta de agua por sus diferentes mecanismos de tolerancia y escape al estrés hídrico, lo que le permite ser cultivada en regiones carentes de insumos naturales que son esenciales para su desarrollo.

Aunque el factor hídrico es uno de los insumos más importantes en la producción de frijol, por lo general, se realizan trabajos bajo condiciones de riego para caracterizar su respuesta a dicho factor con fines de tecnificación y planeación del riego, predicción de la fenología y mejoramiento de la productividad del agua (Rosales-Serna *et al.*, 2021; Tornés *et al.*, 2016a).

Usualmente se recurre al uso de funciones empíricas para estimar los rendimientos con base en el nivel del déficit hídrico aplicado durante una parte o en la totalidad del ciclo del cultivo, como resultado de la compleja respuesta en sus variaciones (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Por lo anterior, el uso de los modelos de simulación biológica resulta una alternativa viable para la estimación de la producción potencial, identificando factores limitantes o para analizar cambios en el manejo hídrico de los cultivos y su producción (López-Cruz *et al.*, 2005). La utilización de modelos para la simulación en los cultivos es limitada en México porque no existe disponibilidad total de los datos que son requeridos por los modelos; en algunos casos existen datos, pero incompletos o con baja calidad, que resultan de baja confiabilidad para su implementación; sin embargo, se han reportado algunos trabajos realizados en México con el modelo AquaCrop para maíz bajo riego en la zona norte de Sinaloa (Flores-Gallardo *et al.*, 2013) y para estudiar cultivos establecidos bajo temporal con escenarios de cambio climático (Arce *et al.*, 2020) pero sin ninguna verificación de los resultados simulados con

datos experimentales en el último caso de estudio.

A pesar de lo anterior, el modelo AquaCrop se ha implementado en diversas regiones del mundo desde su liberación (Raes *et al.*, 2009a) hasta fechas recientes y bajo sus diferentes actualizaciones que han resultado en diferentes versiones (Flores *et al.*, 2015; Raes *et al.*, 2022), puesto que funciona como una herramienta computacional para analizar diferentes escenarios agrícolas (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Se considera como un modelo determinístico para utilizarse por usuarios con pocos conocimientos computacionales debido a su interfaz sencilla y por requerimiento reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos (Raes *et al.*, 2009b).

El objetivo de la presente investigación fue parametrizar el modelo AquaCrop con datos experimentales obtenidos en áreas representativas donde se cultiva frijol de temporal en el estado de Durango, México, para estudiar su desempeño en la simulación del crecimiento y rendimiento en diferentes fechas de siembra y ciclos agrícolas, de acuerdo con las condiciones climáticas y edáficas predominantes de cada sitio; por lo tanto, la calibración y validación del modelo permitirá contar con una herramienta aplicable a una de las principales zonas productoras de frijol bajo condiciones de temporal a nivel nacional y con una potencial implementación en otras regiones agrícolas de México para analizar el comportamiento del cultivo bajo condiciones específicas de producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio y sitios experimentales

La investigación se realizó en el área de influencia de la mayor zona productora de frijol de temporal del estado de Durango, México, la cual se comprende desde los Llanos, que son parte de la región árida del Altiplano Semiárido de México hasta el Valle del Guadiana que se ubica en la parte central de la entidad federativa. Se establecieron seis sitios experimentales durante el ciclo primavera-verano (P-V) 2013 y 2014 en áreas representativas de la producción de frijol de temporal en Durango, México. Para ello, se utilizaron parcelas semi-comerciales ubicadas en los campos experimentales del INIFAP y parcelas comerciales con productores cooperantes (Cuadro 1).

Se sembró en los sitios la variedad de frijol pinto Centauro (Rosales *et al.*, 2012), la cual se caracteriza por tener un rendimiento similar, pero con mayor precocidad en comparación con la variedad Pinto Saltillo, la cual tiene mayor aceptación entre los productores de frijol producido bajo condiciones de temporal (Rosales-Serna *et al.*, 2014;

Sánchez-Valdez *et al.*, 2004). La densidad de población promedio utilizada fue de 87,500 plantas ha⁻¹, lo cual varía por el tipo de sembradora utilizada en las diferentes regiones productoras debido a que la distribución se mide en peso (45 kg ha⁻¹ de semilla). El arreglo topológico consistió en 0.8 m de separación entre surcos para realizar un mejor manejo agronómico (Cuadro 2).

La información climática (Cuadro 3) se obtuvo de los registros de la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas (RENEAA) operada por el INIFAP (INIFAP, 2017), y sirvió de base para la consolidación de los parámetros calibrados del modelo AquaCrop, entre los cuales fueron considerados como parámetros de entrada la densidad de población, productividad del agua, índice de cosecha, temperaturas umbrales, método para calcular los grados día y expansión inicial del dosel vegetal porque fueron obtenidos en campo en los sitios experimentales durante el ciclo agrícola P-V 2013 y 2014 (Cuadro 1); por último, se validó el modelo con datos obtenidos de las parcelas comerciales de frijol de productores cooperantes, las cuales fueron establecidas solamente en el ciclo agrícola P-V 2014 (Cuadro 1),

considerando las características de la variedad y la densidad de población utilizada.

Descripción general del modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop está basado en la respuesta del rendimiento al agua, describiendo la relación entre el rendimiento del cultivo y el estrés hídrico, como resultado del suministro insuficiente de agua por la lluvia o el riego durante el período de crecimiento (Doorenbos y Kassam, 1979). De acuerdo con Raes *et al.* (2009a), el modelo AquaCrop en su primera versión contó con ocho cultivos parametrizados y actualmente consta de 17 cultivos en su catálogo (Raes *et al.*, 2022); por ello, opera con varias ecuaciones que simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo mediante la utilización de información considerada de entrada: clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización, nivel de déficit hídrico, sistema de riego, etc; sin embargo, requiere específicamente de información climática a nivel diario, decenal o mensual de temperatura máxima ($T_{máx}$), temperatura mínima ($T_{mín}$), precipitación (P_p), evapotranspiración de referencia (ET_o) y, además,

Cuadro 1. Ubicación y fechas de siembra de los sitios establecidos con frijol en Durango, México.

Sitio	Coordenadas geográficas		Altitud (msnm)	Fecha de siembra	
	Norte (N)	Oeste (W)		P-V 2013	P-V 2014
INIFAP-Madero	24° 25' 05.5"	104° 20' 27.5"	1975	31/07/2013	N/A
INIFAP-Canatlán	24° 33' 06.0"	104° 44' 31.6"	1941	30/07/2013	11/07/2014
INIFAP-Durango	23° 59' 21.3"	104° 37' 31.9"	1884	02/08/2013	10/07/2014
Peñón Blanco [†]	24° 45' 59.2"	104° 07' 26.4"	1914	N/A	13/08/2014
Lázaro Cárdenas [†]	24° 25' 08.2"	104° 22' 30.6"	1948	N/A	24/07/2014
Canatlán [†]	24° 33' 06.1"	104° 44' 03.7"	1948	N/A	12/07/2014

[†]: Parcela de productor cooperante, N/A: No aplica debido a que no se sembró.

Cuadro 2. Propiedades y clases texturales de los sitios establecidos con frijol en Durango, México (USDA, 2018).

Sitio	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	MO (%)	ρ_a (g cm ⁻³)	Clase textural
INIFAP-Madero	67	23	10	1.20	1.2	Franco arenoso
INIFAP-Canatlán	69	21	10	0.22	1.3	Franco arenoso
INIFAP-Durango	50	36	14	0.16	1.2	Franco
Peñón Blanco [†]	54	21	25	0.34	1.2	Franco arcillo arenoso
Lázaro Cárdenas [†]	47	26	27	1.20	1.2	Franco arcillo arenoso
Canatlán [†]	70	23	7	0.37	1.3	Franco arenoso

[†]: Parcela de productor cooperante, MO: materia orgánica, ρ_a : densidad aparente del suelo.

considera como referencia una concentración media anual de CO₂ en la atmósfera de 369.47 ppm para el año 2000 (mediciones realizadas en el observatorio de Manua Loa, Hawái) y 500 ppm para el año 2057, esto último dependerá del escenario de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) debido a que los valores de la concentración de dicho gas han sido actualizados de acuerdo con los escenarios de cambio climático vigentes, (Representative Concentration Pathways, RCP por sus siglas en inglés).

Análisis estadístico de los datos observados y simulados

Se realizó el procedimiento indicado por Flores-Gallardo *et al.* (2013) para llevar a cabo la parametrización del modelo AquaCrop mediante el proceso de calibración y validación con los datos obtenidos en campo, para finalmente aplicar un análisis estadístico a los datos de rendimiento y duración del ciclo del cultivo observados en campo con respecto a los simulados. Para lo anterior, se utilizaron las métricas estadísticas raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) e índice de Willmott (*d*), de acuerdo con Willmott (1982), calculados con las Ecuaciones 1 y 2:

$$RMSE = [n^{-1} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2]^{0.5} \quad \text{Ec. 1}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i| + |O_i|)^2}, 0 \leq d \leq 1 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde *n* es el número de observaciones realizadas, *S_i* y *O_i* son los valores simulados y observados, respectivamente.

Debido a que *RMSE* representa una medida global entre los valores observados y simulados, se considera como un indicador de la incertidumbre porque toma las mismas

unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a 0 indica el mejor desempeño en la simulación (Hsiao *et al.*, 2009; Willmott, 1982). El valor *d* (Ecuación 2) varía desde 0 hasta 1; por lo tanto, ambos análisis fueron aplicados de forma secuencial a los datos observados y simulados. Por último, y con la finalidad de comparar estadísticamente los valores *S_i* contra los valores *O_i*, se utilizaron las métricas estadísticas coeficiente de variación (*CV*) y desviación estándar (*σ*), calculados con las Ecuaciones 3 y 4:

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{X}|} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde *σ* es la desviación estándar, \bar{X} es el valor medio y *X_i* es cada observación registrada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido al requerimiento hídrico durante el ciclo del cultivo, y con la precipitación registrada, el rendimiento fue afectado o favorecido según la ubicación del sitio y de acuerdo con las condiciones que se presentaron en cada parcela de frijol, puesto que se tuvieron variaciones de esta variable entre 215.4 y 376.9 mm durante los ciclos agrícolas P-V 2013 y 2014 (Figura 1).

Rendimiento observado y simulado

De acuerdo con Flores-Gallardo *et al.* (2014), a pesar de la importancia alimenticia y productiva del frijol en Durango, México, dicha leguminosa ha sido relegada para su cultivo en áreas no aptas, donde es casi imposible producir otras especies agrícolas debido a varios factores limitantes. Lo anterior genera incertidumbre en los rendimientos

Cuadro 3. Localización y uso de información climática obtenida de las estaciones agrometeorológicas automatizadas.

Sitio	Coordenadas geográficas		Nombre de la estación
	Latitud N	Longitud W	
INIFAP-Madero	24° 24' 56.3"	104° 20' 28.5"	Francisco I. Madero
INIFAP-Canatlán	24° 33' 10.6"	104° 44' 28.7"	Canatlán
INIFAP-Durango	23° 59' 12.42"	104° 37' 38.7"	CEVAG
Peñón Blanco [†]	24° 45' 15.4"	104° 8' 55.9"	Peñón Blanco
Lázaro Cárdenas [†]	24° 24' 56.3"	104° 20' 28.5"	Francisco I. Madero
Canatlán [†]	24° 33' 10.6"	104° 44' 28.7"	Canatlán

[†]: Parcela de productor cooperante.

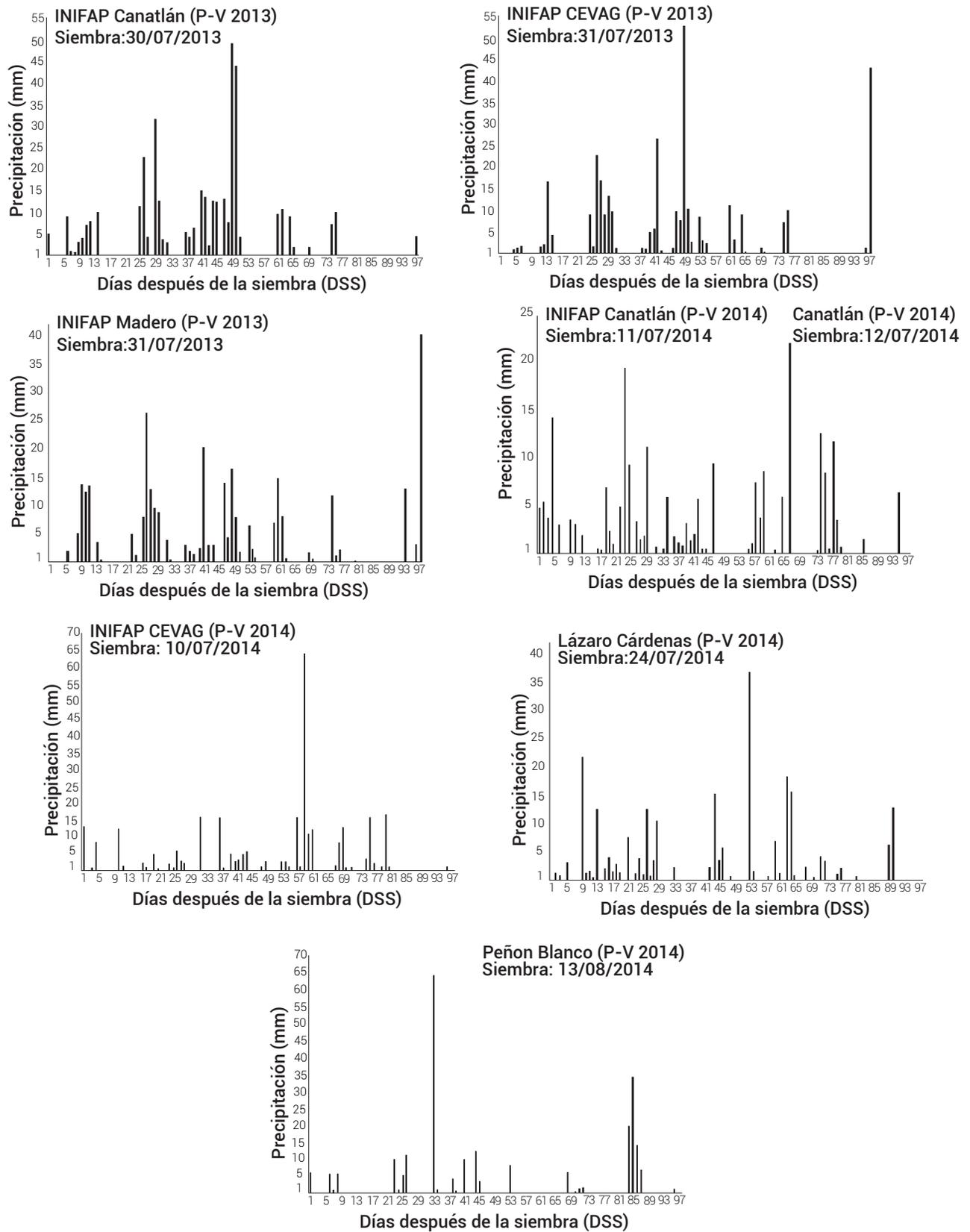


Figura 1. Registro de la Pp en los sitios de INIFAP y parcelas de productores cooperantes durante el ciclo agrícola P-V del año 2013 y 2014.

esperados y se requiere de herramientas que simulen la probabilidad del rendimiento bajo las condiciones específicas donde se producirá el cultivo, puesto que actualmente no se reportan trabajos sobre el tema con frijol de temporal. Considerando el desarrollo de los componentes de rendimiento en una planta relacionados directamente con los efectos ocasionados por el clima y las fechas de siembra en las cuales se establece un cultivo, impactando en el índice de área foliar (*I_AF*), índice de cosecha (*H_i*), rendimiento de la biomasa (*B*) seca y grano (Tsimbaa *et al.*, 2013).

En el Cuadro 4 se muestran los rendimientos de grano obtenidos durante el ciclo agrícola P-V en los años 2013 y 2014, incluyendo los diferentes sitios con datos *O_i* y *S_i* con el modelo AquaCrop. Los resultados indican que las predicciones del rendimiento de grano con el modelo AquaCrop son buenas debido a que se obtuvo un valor de 0.18 t ha⁻¹ para *RMSE* y un índice de Willmott (*d*) de 1.0, comparándose con gran similitud al trabajo de González-Robaina *et al.* (2019) relacionado con frijol cultivado bajo riego.

Una de las características que define en la mayoría de las ocasiones la producción del cultivo es la cantidad de *B* generada durante su ciclo biológico, puesto que dicho resultado define el grado de trabajo que efectúa la planta para producir su alimento y la producción final de fruto o grano. Por lo anterior, los rendimientos de grano obtenidos presentaron un alto coeficiente de determinación (*R*²), con un valor de 0.94 (Figura 2), resultados similares a los reportados por Tornés *et al.* (2016b), lo que está sumamente

relacionado con la producción de *B* (Cuadro 5, Figura 3) en la mayoría de los sitios experimentales donde se registró una cantidad de precipitación que cubrió la demanda hídrica del cultivo, con un *R*² de 0.65, que se puede considerar como el resultado de la transformación de la energía solar en energía química, aunque actualmente la producción y conservación de la *B* de cualquier cultivo cobra una gran importancia porque contribuye a la protección ambiental mediante la captura de carbono (Martínez y Leyva, 2014). En estudios realizados con frijol bajo riego utilizando el modelo AquaCrop se reportaron rendimientos de grano de 2.4 t ha⁻¹ (Tornés *et al.*, 2016a), lo cual está en concordancia con los resultados reportados en las estadísticas agrícolas del cultivo a nivel nacional y con el presente estudio hubo una diferencia o subestimación de 1.4 t ha⁻¹, lo cual se debe a la diferente modalidad de producción.

Fenología observada en campo vs. simulación

Se ha comprobado que diferentes variedades de frijol cultivadas bajo riego presentan diferencias en tiempo y el desarrollo de los grados día (°D) con respecto a su desarrollo bajo condiciones de temporal (Rosales-Serna *et al.*, 2019), lo cual es importante definir para establecer el cultivo en un período adecuado para su desarrollo y evitar contingencias por efectos del clima, puesto que en otras regiones agrícolas se reporta sensibilidad a las temperaturas y valores de 9 y 30 °C para la *T_{min}* y *T_{max}* (Raes *et al.*, 2022). Los parámetros conservativos del modelo AquaCrop fueron adaptados y modificados para simular las condiciones reales de los diferentes sitios de Durango (Cuadro 6); por lo anterior, se llevó a cabo la calibración

Cuadro 4. Resultados del rendimiento de grano observados en campo y simulados con AquaCrop en su validación.

Sitio	σ	Rendimiento (t ha ⁻¹)	
		<i>O_i</i>	<i>S_i</i>
INIFAP-Madero	0.05	1.125	1.191
INIFAP-Canatlán 2013	0.25	1.881	2.229
INIFAP-Durango 2013	0.10	1.336	1.471
INIFAP-Canatlán 2014	0.05	0.292	0.223
INIFAP-Durango 2014	0.09	1.835	1.704
Peñón Blanco [†]	0.09	0.749	0.621
Lázaro Cárdenas [†]	0.18	0.384	0.645
Canatlán [†]	0.07	0.183	0.288
Promedio	0.11	0.973	1.047

[†]: Parcela de productor cooperante.

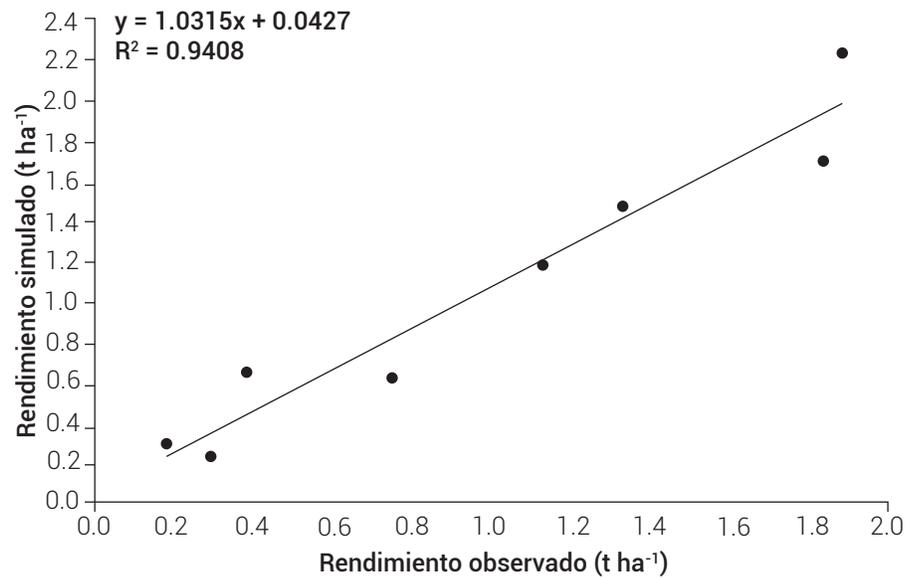


Figura 2. Valores de rendimiento de grano O_i y S_i con el modelo AquaCrop.

Cuadro 5. Resultados del rendimiento de biomasa seca observados en campo y simulados con AquaCrop.

Sitio	σ	Biomasa seca (t ha ⁻¹)	
		O_i	S_i
INIFAP-Madero	0.18	1.678	1.426
INIFAP-Canatlán 2013	0.08	2.739	2.622
INIFAP-Durango 2013	0.23	2.098	2.429
INIFAP-Canatlán 2014	0.35	2.721	2.226
INIFAP-Durango 2014	0.91	4.141	2.851
Peñón Blanco [†]	0.39	3.954	3.406
Lázaro Cárdenas [†]	0.64	2.792	1.885
Canatlán [†]	0.10	2.430	2.288
Promedio	0.36	2.819	2.392

[†]: Parcela de productor cooperante.

y validación de los parámetros de entrada, así como algunos conservativos donde se refleja una diferencia en el comportamiento fenológico del cultivo observado en campo con lo simulado por el modelo AquaCrop (Figura 4).

Cabe mencionar que solamente se estudió una de las variedades de frijol más utilizadas por los productores de la región de estudio, por lo que se requieren los datos del resto de variedades utilizadas en el mercado para tener una gama amplia de simulaciones y recomendaciones, debido a que se cuenta con una gran diversidad de variedades

y condiciones de producción en las zonas agrícolas de México.

CONCLUSIONES

El modelo AquaCrop mostró una alta correlación por la gran cercanía entre los datos O_i y S_i para el cultivo de frijol; aunque es un modelo para simular la productividad del agua de los cultivos, tuvo un buen desempeño para las condiciones de temporal, reflejando que existe un impacto en el dosel vegetal del cultivo ocasionado por

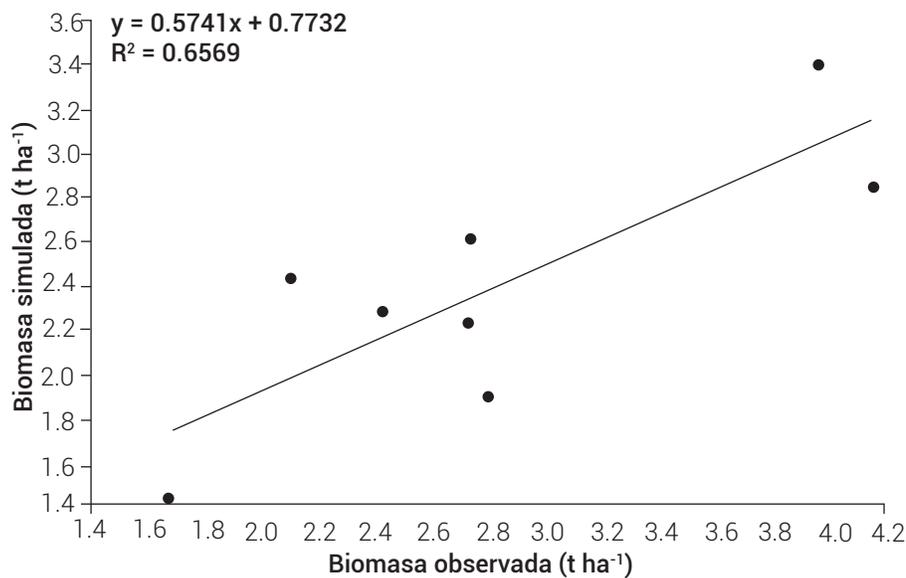


Figura 3. Valores de biomasa (*B*) *O_i* y *S_i* con el modelo AquaCrop.

Cuadro 6. Parámetros conservativos y adaptados del modelo AquaCrop para calibrar la simulación del rendimiento de frijol bajo condiciones de temporal.

Parámetro	Conservativo	Calibrado
Temperatura base (°C) donde no se desarrolla el cultivo	9	8
Índice de cosecha de referencia (<i>H_{io}</i>) (%)	40	34
Parámetros de entrada	AquaCrop	Experimental
Densidad de población (plantas ha ⁻¹)	131579	87500
°D: de la siembra a la emergencia	59	69.80
°D: desde la siembra hasta la madurez	1298	1010.68
°D: de la siembra a la floración	556	482.33
Días calendario: desde la siembra hasta la emergencia	6	7
Días calendario: desde la siembra hasta la floración	47	41
Días calendario: desde la siembra hasta la madurez	115	97

las condiciones de estrés hídrico y térmico propiciadas por las condiciones climáticas de cada sitio experimental. El desempeño estadístico que mostró el modelo para las condiciones predominantes del estado de Durango, México, indica que se puede implementar en otras regiones productoras de frijol de México con su previa calibración y validación, con el propósito de ofrecer alternativas de manejo a los productores.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento de los estudios de posgrado del primer autor con la beca número 721689.

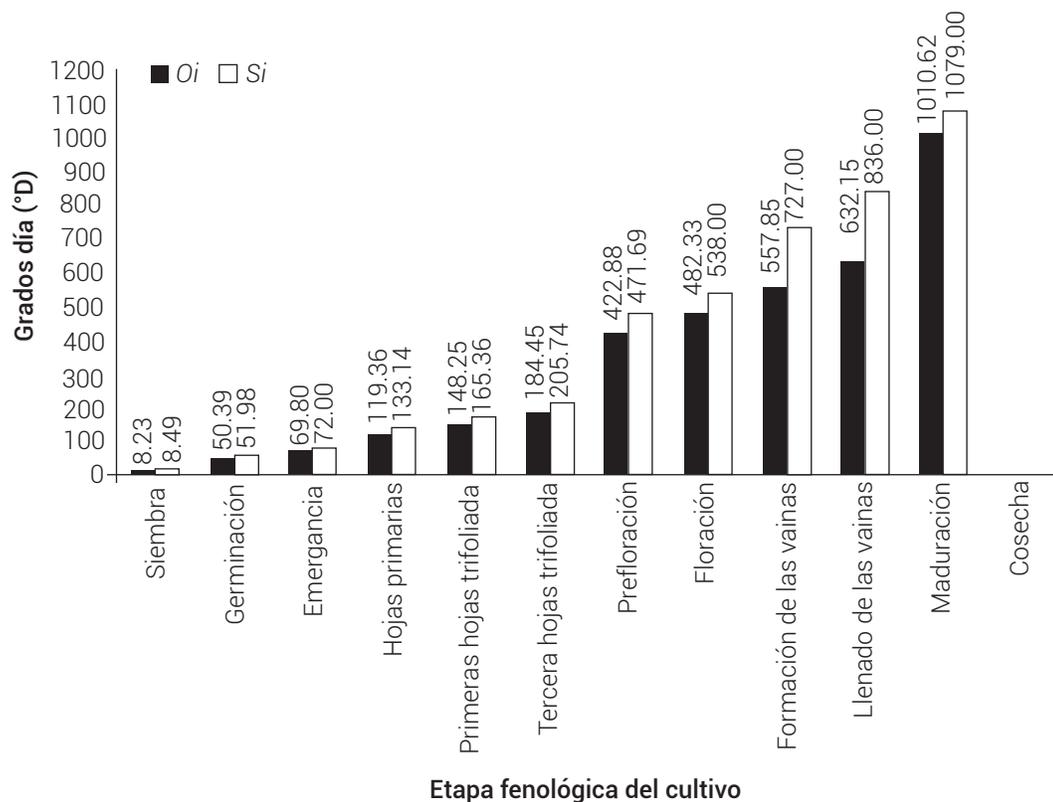


Figura 4. Comportamiento fenológico promedio observado en campo (O) en comparación con la fenología simulada (S) con AquaCrop.

BIBLIOGRAFÍA

- Arce R. A., A. I. Monterroso R., J. D. Gómez D., M. Á. Palacios M., E. N. Navarro S., J. López B. and A. C. Conde Á. (2020) Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmósfera* 33:215-231, <https://doi.org/10.20937/ATM.52430>
- Borja-Bravo M., E. S. Osuna-Ceja, S. Arellano-Arciniega, R. V. García-Hernández y M. Á. Martínez-Gamiño (2018) Competitividad y eficiencia en la producción de frijol en condiciones de temporal con tecnología tradicional y recomendada. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41:443-450, <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.443-450>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2022) Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado. Año Agrícola 2020-2021. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. 149 p.
- Doorenbos J. and A. H. Kassam (1979) Yield Response to Water. Irrigation and Drainage. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 193 p.
- Farooq M., N. Gogoi, S. Barthakur, B. Baroowa, N. Bharadwaj, S. Alghamdi and K. H. M. Siddique (2017) Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203:81-102, <https://doi.org/10.1111/jac.12169>
- Flores G. H., W. Ojeda B., A. Ruiz G. y H. Flores M. (2015) AquaCrop: una herramienta para generar calendarios de riego. In: Calendarización del Riego: Teoría y Práctica. W. Ojeda B. y J. Flores V. (eds.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. pp:E1-E22.
- Flores-Gallardo H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra y E. Mejía-Sáenz (2013) Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia* 47:347-359.
- Flores-Gallardo H., R. Rosales-Serna y H. Flores-Magdaleno (2014) Técnicas de cosecha de agua para la producción sostenible de frijol en Durango. Folleto Técnico No. 74. Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP. Durango, México. 28 p.
- González-Robaina F., D. López-Vargas, E. Cisneros-Zayas, J. Herrera-Puebla y G. Cid-Lazo (2019) Calibración y análisis de sensibilidad del modelo AquaCrop para frijol en suelo ferralítico rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola* 9:3-12.
- 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. *Agronomy Journal* 101:488-498, <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- 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. *Agronomy Journal* 101:448-459, <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2017) Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Ciudad de México, México. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-nacional-de-estaciones-agrometeorologicas-automatizadas-inifap> (Agosto 2017).
- 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. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11:257-267, <https://doi.org/10.5154/rchsh.2003.08.050>
- Martínez R. A. y A. Leyva G. (2014) La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales* 35:11-20.
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres (2009a) AquaCrop. Reference

- Manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 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. *Agronomy Journal* 101:438-447, <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres (2022) AquaCrop Version 7.0. Reference Manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 667 p.
- Rosales S. R., F. J. Ibarra P. y E. I. Cuéllar R. (2012) Pinto Centauro, nueva de frijol para el estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:1467-1474, <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1354>
- Rosales-Serna R., C. A. Nava-Berumen, H. González-Ramírez, M. D. Herrera, J. C. Jiménez-Galindo, N. Y. Z. Ramírez-Cabral y E. S. Osuna-Ceja (2014) Rendimiento, preferencia y calidad de enlatado de variedades de frijol pinto producidas en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:309-315, <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i2.968>
- Rosales-Serna R., H. Flores-Gallardo and J. C. López-González (2016) Water regime effects on phenology and seed yield of common bean in Durango, Mexico. *Annual Report Bean Improvement Cooperative* 59:241-242.
- Rosales-Serna R., H. Flores-Gallardo, C. A. Nava-Berumen e I. A. Ortiz-Sánchez (2019) Rendimiento y calidad de grano en líneas mejoradas de frijol cultivadas bajo riego en Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:39-46, <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.1.39-46>
- Rosales-Serna R., H. Flores-Gallardo, J. C. López-González, J. E. Rubiños-Panta, I. A. Ortiz-Sánchez, H. Flores-Magdaleno, ... y P. A. Domínguez-Martínez (2021) Fenología y productividad del agua en variedades mejoradas de frijol pinto cultivadas en Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44:511-519, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.511>
- Sánchez-Valdez I., J. A. Acosta-Gallegos, F. J. Ibarra-Pérez, R. Rosales-Serna and S. P. Singh (2004) Registration of 'Pinto Saltillo' common bean. *Crop Science* 44:1865-1866, <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.1865a>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020) Panorama Agroalimentario 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. 196 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022a) Expectativas Agroalimentarias 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. 60 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022b) Panorama Agroalimentario 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. 215 p.
- Siddiqui M. H., M. Y. Al-Khaishany, M. A. Al-Qutami, M. H. Al-Whaibi, A. Grover, H. M. Ali, ... and N. A. Bukhari (2015) Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. *International Journal of Molecular Sciences* 16:10214-10227, <https://doi.org/10.3390/ijms160510214>
- 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. *Agronomy Journal* 101:426-437, <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Tornés O. N., O. Brown M., Y. Gómez M. y A. M. Guerrero A. (2016a) Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 25:35-38, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30090.06080>
- Tornés O., N., O. Brown M., Y. Gómez M. y A. M. Guerrero A. (2016b) Maximización física y económica del agua de riego en la producción del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 25:23-30.
- Tsimbaa R., G. O. Edmeades, J. P. Millner and P. D. Kemp (2013) The effect of planting date on maize grain yields and yield components. *Field Crops Research* 150:135-144, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.028>
- USDA, United States Department of Agriculture (2018) Soil Survey Manual. Agriculture Handbook No. 18. Soil Science Division, United States Department of Agriculture. Lincoln, Nebraska, USA. 603 p..
- Villordo-Pineda E., M. M. González-Chavira, P. Giraldo-Carbajo, J. A. Acosta-Gallegos and J. Caballero-Pérez (2015) Identification of novel drought-tolerant-associated SNPs in common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Frontiers in Plant Science* 6:546, <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00546>
- Willmott C. J. (1982) Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63:1309-1313, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)