



ADECUACIÓN DE FECHAS DE SIEMBRA POR VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN FRIJOL (*Phaseolus vulgaris*) MEDIANTE AQUACROP-FAO, EN SINALOA, MÉXICO

Vladimir Ruiz Pérez^{1*}; Ernesto Sifuentes Ibarra²; Waldo Ojeda Bustamante³; Jaime Macías Cervantes⁴

¹ Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Universidad Autónoma de Sinaloa. Calle 16 Av. Japaraqui Juan José Ríos, Sinaloa, México C.P.81110

vdyx@hotmail.com – +52 (668) 1623-643 (*Autor de correspondencia)

² Estudiante de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua-MTA e investigador del Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550

³ Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550.

⁴ Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera México-Nogales km 1609, Juan José Ríos, Sinaloa, México, C.P. 81110

Resumen

En el presente trabajo se simuló la productividad del cultivo de frijol utilizando el modelo de simulación biológica AQUACROP como herramienta para generar información sobre planificación y manejo del cultivo, proporcionando al productor herramientas que le permitan la adaptación requerida para hacer frente a los problemas productivos causados por la variabilidad climática. El objetivo de esta investigación fue calibrar el modelo AQUACROP en la simulación de cobertura foliar, balance de humedad en el suelo y producción de biomasa seca, así como, generar información sobre planeación y manejo cultivo definiendo la mejor fecha de siembra. Los datos para la calibración y validación del modelo se obtuvieron de una serie de ensayos e investigaciones que se llevaron a cabo en las instalaciones del INIFAP Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2010/2011. La calibración fue realizada modificando los parámetros de prácticas de manejo empleando las tecnologías de producción de frijol para el norte de Sinaloa. La validación se realizó simulando la respuesta del cultivo a diferentes escenarios de disponibilidad de agua, los calendarios de riego empleados se generaron con el software IRRIMODEL. Para definir la mejor fecha de siembra se utilizó una serie histórica climática de 20 años para simular el rendimiento bajo condiciones de variabilidad climática. Los resultados muestran al modelo como una alternativa viable para reproducir la fenología y productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y variabilidad climática.

Palabras claves: requerimientos hídricos, manejo de estrés, rendimiento.



Introducción

La agricultura es una de las principales actividades económicas del país, sin embargo, cada año el rendimiento de los cultivos se ve afectado por la falta de tecnologías apropiadas y factores ambientales extremos causados por la variabilidad de las condiciones climáticas. Thornton (2014) señala que las poblaciones con menor capacidad de adaptación serán más afectadas por la variabilidad climática, por lo que será necesario mejorar los rendimientos de los cultivos para esas zonas y asegurar la producción y la seguridad alimentaria.

El uso de modelos para la predicción de rendimiento tiene como objetivo principal conocer con mayor certeza las relaciones clima-suelo-cultivo y generar información que se pueda aprovechar en la planificación y manejo de la producción ante la variabilidad climática, de igual forma y de manera indirecta buscan la optimización de recursos entre ellos el agua de riego ya que un manejo inadecuado provocaría daños irreversibles a las zonas agrícolas como la desertificación de suelos y reducción en la disponibilidad hídrica (Donlon, 2014).

En la actualidad existen diversos modelos utilizados en la simulación del rendimiento de cultivos, uno de estos es el modelo AQUACROP (Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009) el cual es un modelo general de aplicación empírica de cultivos, AQUACROP se ha utilizado en varias zonas del mundo bajo diferentes condiciones ambientales (Stricevic *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2015; Trombetta *et al.*, 2016) y se considera una herramienta importante de investigación y apoyo para la toma de decisiones en la transferencia de tecnología. Es utilizado también para evaluar y predecir los efectos del cambio climático en cultivos después de una etapa de calibración experimental. Con base en esto es posible generar recomendaciones para diseñar estrategias de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático, en las zonas de riego (Schmidt *et al.* 2012), sin embargo, existen pocos estudios en el cultivo de frijol (*Phaseolus, vulgaris*), considerado de alta sensibilidad a la temperatura, haciendo urgente adaptar su actual tecnología de producción ante la variabilidad climática.

En México el frijol ocupa un lugar importante en la economía agrícola, tanto por la superficie que se le destina, como por la derrama económica que genera. Su producción está orientada a satisfacer la demanda nacional, ya que el consumo de esta leguminosa ocupa un lugar importante dentro de la dieta diaria en las familias mexicanas. El estado de Sinaloa es uno de los principales productores de frijol, durante el ciclo otoño-Invierno (OI) 2017/2018, se cosechó una superficie, de 94 594 ha en condiciones de riego, con un rendimiento medio de 1.81 t ha⁻¹, así como 1 242 ha establecidas en temporal con un rendimiento medio de 990 kg ha⁻¹. La producción global obtenida ascendió a 173 526 toneladas, mientras que el rendimiento medio estatal fue de 1 8 t ha⁻¹ (SIACON, 2018). Este cultivo es el segundo grano básico en importancia para el estado de Sinaloa solo por debajo del maíz.

Desafortunadamente en los últimos años en el estado de Sinaloa, principalmente en la zona norte, se han observado efectos adversos de la temperatura en este cultivo, impactando negativamente en el rendimiento aun cuando se siguen las



recomendaciones del paquete tecnológico actual. Ante esta situación se requiere un análisis detallado de estos escenarios que permitan adecuar su manejo agronómico principalmente las fechas de siembra.

En este trabajo se calibró el modelo AQUACROP para el cultivo de frijol en el norte de Sinaloa, México, considerando las variables cobertura foliar, balance de humedad en el suelo y producción de biomasa. Se generaron simulaciones de rendimiento bajo diferentes fechas de siembra durante los últimos 20 años, lo cual permitió cuantificar el efecto del clima en el rendimiento e identificar nuevas ventanas de siembra que reduzcan los efectos adversos de la variabilidad climática.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola OI 2010/2011 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP, ubicado en el norte de Sinaloa en las coordenadas 25° 45'49" Latitud Norte y -108° 51'41" Longitud Oeste con una altura de 20 msnm. Se utilizó información obtenida en una parcela con riego por goteo de 9 120 m² (50 camas de 1.6 m x 114 m), textura arcillosa, pendiente plana, pobre en materia orgánica, sin problema de sales y humedad aprovechable (HA) de 0.15 cm³ cm⁻³.

El cultivo se estableció el 15/11/2010 utilizando semilla certificada variedad Azufrado Higuera, manteniendo condiciones óptimas de humedad y fertilización durante todo el desarrollo del cultivo. La programación de los riegos se realizó con el programa IRRIMODEL © del INIFAP el cual se basa en el concepto grados-día y es operado a través de Internet. Las variables medidas fueron fenología, cobertura vegetal, materia seca, humedad del suelo, láminas y frecuencias de riego, rendimiento e índice de cosecha (Hi).

Esta información sirvió para parametrizar el modelo AQUACROP, el cual requiere información de densidad de población, conductancia estomática, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua, índice de cosecha, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, además de información climática diaria, decenal o mensual de temperatura del aire (T) máxima y mínima (T_{max} y T_{mín}), evapotranspiración de referencia (E_{To}) y precipitación (Pp), considerando una concentración anual de CO₂ en la atmósfera de 369.47 mg L⁻¹ para el año 2000.

En la **Tabla 1** se muestran las ecuaciones que AQUACROP utiliza para el cálculo de biomasa y producción de grano.

Tabla 1. Ecuaciones usadas por AQUACROP para la estimación de biomasa y producción de grano

Variable	Ecuación	Descripción
Rendimiento del cultivo	$Y = B * Hi$	<i>B</i> es la biomasa del cultivo y <i>Hi</i> índice de cosecha dependiendo del tipo y variedad del cultivo.
Crecimiento de dosel vegetal	$CC = CC_0 e^{rCCt}$	<i>CC</i> es la cobertura del dosel vegetal a tiempo <i>t</i> transcurrido



	<p>Para la condición $CC \leq CC_x/2$</p> $CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_0} e^{-CGC}$ <p>Para la condición $CC > CC_x/2$</p>	<p>(expresado en días o °D), CC_0 cobertura inicial del dosel ($t=0$), CC_x máxima cobertura del dosel vegetal, CGC coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo para el cultivo considerado.</p>
Índice de área foliar	$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2}$	<p>Ajuste del crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población (plantas ha-1). Estimación a partir de datos de índice de área foliar (IAF).</p>
Grados día (°D)	$^{\circ}D = T_a - T_{c-min}, T_a > T_{c-min}$ $^{\circ}D = 0, T_a \leq T_{c-min}$	<p>T_a = Temperatura promedio, T_c = Temperatura máxima, T_{min} = Temperatura mínima</p>
Temperatura promedio T_a (método 3)	$T_a = \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-max}$ $T_a = \frac{T_{c-max} + T_n}{2}, T_x \geq T_{c-max}$ $T_a = \frac{T_{c-min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-min}$	<p>T_{c-min} y T_{c-max} temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual la planta se desarrolla. T_x y T_n temperaturas máxima y mínima del día registradas.</p>

Debido a que AQUACROP no cuenta con el cultivo de frijol en sus catálogos, para la calibración se utilizaron los parámetros precargados para el cultivo de soya (*Glycine max*) por su similitud taxonómica. La simulación puede realizarse sin tomar en cuenta estrés hídrico obteniendo láminas requeridas por el cultivo para el periodo de simulación. Sin embargo, es posible estimar la afectación del cultivo al estrés térmico e hídrico, el primero a partir de la información climática especialmente para el periodo de polinización, mientras que para el segundo considera los efectos: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal, y 3) cierre estomático.

En este trabajo se utilizaron los datos obtenidos de la parcela para la calibración del modelo y estar en condiciones de modelar para riego por gravedad generando calendarios de riego con reducción de lámina, simulando un escenario de restricción de humedad.

Una vez calibrado el modelo, se utilizó una base de datos de información climática diaria de 20 años para simular el comportamiento histórico del rendimiento en diferentes años y fechas de siembra, con el fin de conocer el efecto de la variabilidad climática y explorar nuevas ventanas de siembra que ayuden a reducir el impacto negativo de esta condición.



Resultados y Discusión

Parámetros conservativos y específicos

Los parámetros conservativos del modelo AQUACROP para condiciones no limitantes de fertilidad ajustados para el norte de Sinaloa, México se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Parámetros conservativos de frijol para el modelo AQUACROP ajustados para las condiciones del norte Sinaloa, México

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura Base	8	°C
Temperatura Máxima	23	°C
Dosel vegetal al 90% emergido (CC0)	5	cm ²
Máximo dosel vegetal (CCx)	90	% (en función de la densidad de la planta)
Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000	17	Biomasa por m ² (en función del CO ₂ atmosférico)
Índice de cosecha (Hi) como referencia	35	% (valor normal para este cultivo)

En la **Tabla 3** Se pueden observar los parámetros específicos obtenidos para la evaluación del modelo.

Tabla 3. Parámetros específicos para la evaluación del modelo AQUACROP en frijol en el norte de Sinaloa, México

Parámetro	Valor	Unidad
Fecha de siembra	15/11/2010	
Densidad de siembra	175 000	Plantas ha ⁻¹
Días a germinación	13	°D
Máxima cobertura vegetal	90	%
Inicio de la senescencia	91	Días
Inicio de la maduración	106	Días
Inicio de floración	45	Días
Duración de la floración	21	Días
Profundidad efectiva de raíz	0.6	m
Índice de cosecha calculado	0.35	--

Precisión de la calibración

En la variable cobertura foliar el modelo generó un ajuste con alto nivel de precisión hasta el día 25, sin embargo, durante los próximos 30 días el modelo la sobrestima. Cuando se logra la máxima cobertura foliar después del día 60, la curva se ajusta en

forma adecuada hasta el final del ciclo del cultivo. En riego por goteo al reducir el estrés hídrico el cultivo conserva la mayor parte del follaje hasta etapas finales (**Figura 1**). AQUACROP, según Steduto (2009) y Araya (2010) tiende a sobrestimar la cobertura en etapas finales del cultivo como se ha demostrado en la parametrización de cultivos como maíz y cebada, explicando así el ajuste de la curva en etapas de senescencia. Es importante que la calibración de valores de cobertura foliar sea correcto ya que para el modelo AQUACROP este parámetro afecta la tasa transpiratoria y en consecuencia la acumulación de biomasa (Farahani *et al.*, 2009).

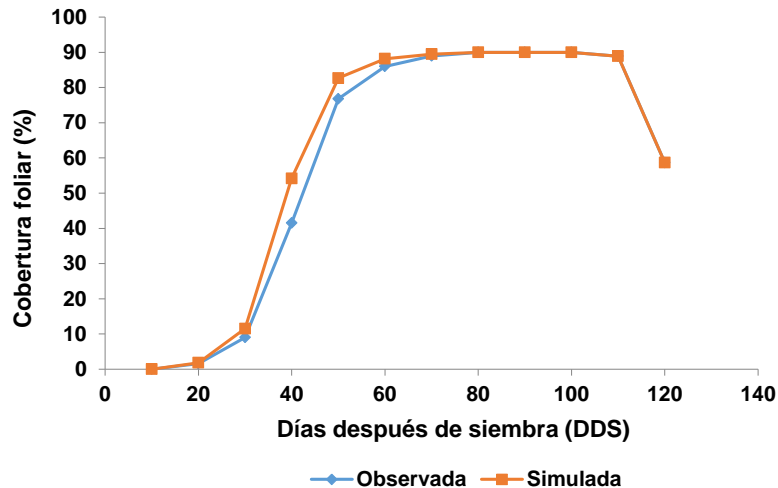


Figura 1. Comparación de la cobertura foliar simulada con AQUACROP y observada en el cultivo de Frijol en el norte de Sinaloa

En producción de biomasa, se aprecia una sobrestimación después del día 40 que coincide con la sobrestimación de cobertura foliar que influye de manera directa en los valores de producción de biomasa. El desarrollo del cultivo bajo condiciones óptimas (riego por goteo) permite un desarrollo adecuado del cultivo lo que ayuda a una buena acumulación de biomasa, después del día 50 el modelo sobrestima este parámetro pero su comportamiento es paralelo a lo observado, esto se debe a que el modelo después de lograr la máxima cobertura vegetal asume un crecimiento lineal hasta llegar a senescencia (Guendouz *et al.*, 2014; Amiri, 2016), comportamiento que se muestra al comparar valores observados y simulados (**Figura 2**). Por otra parte Según Steduto *et al.* (2009), AQUACROP utiliza en la simulación de la biomasa seca un modelo donde relaciona este parámetro con la evapotranspiración del cultivo a través de la variable productividad del agua (WP).

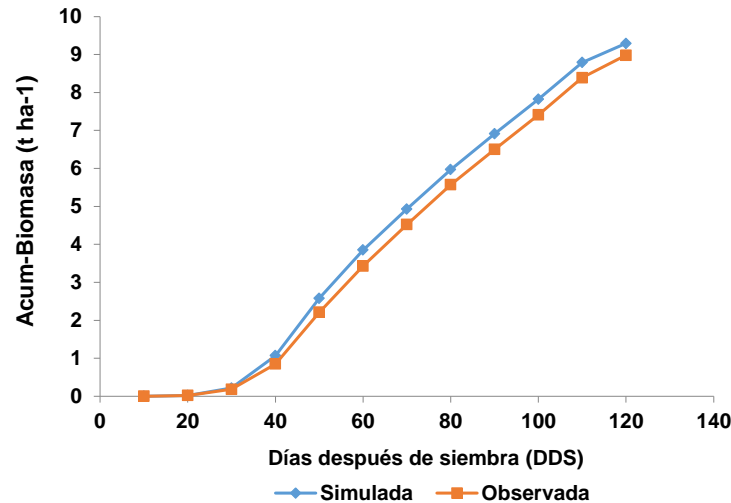


Figura 2. Comparación de la producción de biomasa modelada con AQUACROP y observados en el cultivo de frijol en el norte de Sinaloa

Con respecto a la evolución del contenido de humedad en el perfil del suelo (**Figura 3**), el balance que realiza el modelo fue similar tanto en tendencia como en valores obtenidos en el experimento, el modelo AQUACROP tiende a sobrestimar el contenido de humedad prácticamente en todo el ciclo, después del día 20 está sobrestimación es más notoria.

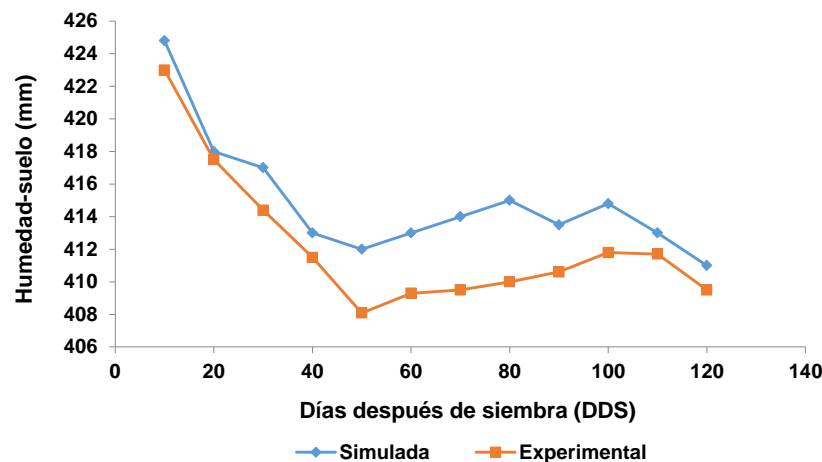


Figura 3. Comparación de valores simulados con AQUACROP y observados de la humedad del suelo en el cultivo de frijol en el norte de Sinaloa

De forma general se considera que la calibración de los parámetros que simulan las fases de desarrollo fue satisfactoria, ya que el sesgo encontrado no representa valores significativos y los valores son similares a los observados en campo.

La **Tabla 4** muestra los resultados obtenidos de rendimiento para la simulación de datos observados, modelados y modelados sin estrés hídrico como limitante.



Tabla 4. Resultados de rendimiento de datos observados y simulados

Variable	Observado	Modelado AQUACROP	Modelado sin estrés hídrico
Fecha de Siembra	15/11/2010	15/11/2010	15/11/2010
Densidad (plantas ha ⁻¹)	175 000	175 000	175 000
Textura	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
Fertilización (NPK)	222-48-269	Sin estrés de fertilidad	Sin estrés de fertilidad
Temperatura umbral °C	Mín= 8; Máx= 23	Mín= 8; Máx= 23	Mín= 8; Máx= 23
Días a madurez	128	127	127
°D a madurez	1235	1227	1227
Lamina neta (mm)	347	347	325
Lamina Bruta (mm)	371	371	325
Biomasa (t ha ⁻¹)	9.145	9.105	9.451
Rendimiento (t ha ⁻¹)	3.23	3.32	3.18

La columna de la derecha (sin estrés hídrico) registra el rendimiento más bajo al igual que la menor lámina requerida, el modelo subestima la cantidad de agua requerida ya que tanto la simulación de datos observados como datos simulados muestran un mayor rendimiento al igual que mayor lámina requerida. Esto concuerda con la sobrestimación del contenido de humedad por parte del modelo, ya que, aun cuando se le indica no limitar la producción por estrés hídrico, este, no concuerda con los datos de rendimiento en la simulación realizada con calendario de riego.

Efecto de la variabilidad climática y ajuste de fecha de siembra

Utilizando datos de clima históricos (últimos 20 años) a intervalos de cinco años se obtuvieron resultados sobre rendimiento del cultivo para diferentes ciclos agrícolas y fechas de siembra, encontrando que el mejor periodo de siembra para los ciclos 1998-1999 y 2000-2001 es del 01 al 15 de octubre (fecha empleada actualmente), para los ciclos 2005-2006 y 2009-2010 la tendencia es hacia los últimos días del mes de octubre y principios del mes de noviembre, mientras que para los ciclos 2015-2016 y 2017-2018 la mejor ventana de siembra se desplaza hacia la primer semana de noviembre como se muestra en la **Figura 4**.

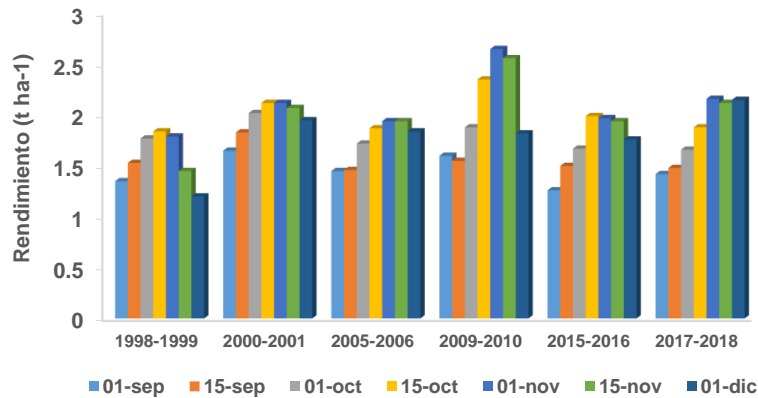


Figura 4. Comportamiento de la productividad del cultivo de frijol para diferentes años y fecha de siembra en el norte de Sinaloa.

Realizando el mismo análisis pero usando valores promedio de ETo y temperaturas máximas y mínimas de los últimos 20 años, se encontró que la mejor fecha se ubica en la segunda quincena del mes de octubre (15 al 31). Analizando el comportamiento promedio de los últimos 3 ciclos agrícolas la tendencia indica un desplazamiento de la ventana de siembra hacia el mes de noviembre, incluso registrando el mejor rendimiento entre el 1 y 10 del mes de noviembre (**Figura 5**).

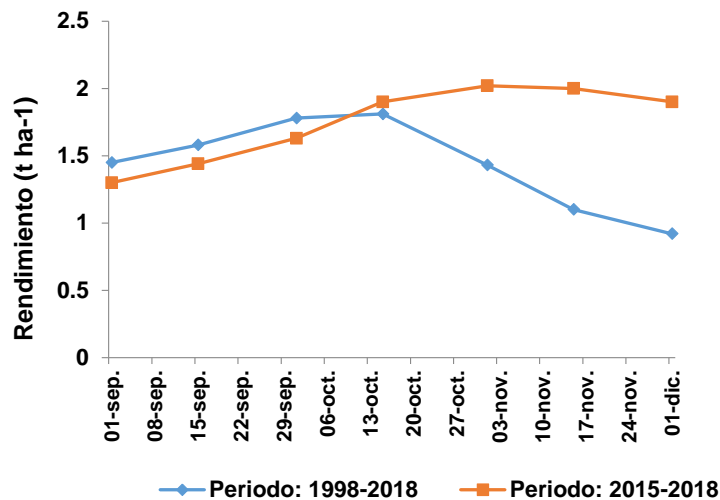


Figura 5. Comportamiento del rendimiento para diferentes fechas de siembra con clima promedio.

Los resultados obtenidos tanto en la calibración del modelo como la validación realizada muestran el correcto ajuste del modelo para reproducir el comportamiento del cultivo de frijol, permitiendo generar información fiable para combatir los efectos causados por la variabilidad climática.



El modelo AQUACROP permite simular la respuesta del cultivo a condiciones que limiten su producción como manejo agronómico, planeación del cultivo y estrés hídrica, este último considerado una herramienta para aminorar los efectos del clima variable.

Conclusiones

- El modelo AQUACROP ha mostrado ser una excelente herramienta de apoyo para la toma de decisiones a nivel parcelario al poder simular con buena confiabilidad el rendimiento del frijol bajo diferentes condiciones de manejo del riego y climáticas, escenarios presentes en los distritos de riego del norte de Sinaloa.
- La ventaja del modelo al simular la productividad en base al requerimiento hídrico es que se pueden generar dichos requerimientos para diferentes fechas de siembra y ubicar la más adecuada para establecer el cultivo.
- La calendarización del riego, la simulación de crecimiento y el pronóstico del rendimiento son algunas de las ventajas de AQUACROP como herramienta de planeación y seguimiento de un ciclo agrícola considerando escenarios como variabilidad climática.

Referencias Bibliográficas

- Amiri, E. (2016). Calibration and Testing of the Aquacrop Model for Rice under Water and Nitrogen Management, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3): 387-403, ISSN: 0010-3624, DOI: 10.1080/00103624.2015.1123719.
- Araya, A.; Habtu, S.; Hadgu, K.M.; Kebede, A.; Dejene, T. (2010). Test of AQUACROP model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*), *Agricultural Water Management*, 97(11): 1838-1846, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2010.06.021.
- Donlon, D. (2014). Center For Food Safety. Food and Climate Connecting the Dots: http://www.centerforfoodsafety.org/files/foodclimate_med_32825.pdf. Fecha de consulta 20 de mayo del 2014
- Farahani, H.J.; Izzi, G.; Oweis, T.Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton, *Agronomy Journal*, 101(3): 469, ISSN: 1435-0645, DOI: 10.2134/agronj2008.0182s.
- Guendouz, A.; Hafsi, M.; Moumeni, L.; Khebbat, Z.; Achiri, A. (2014). Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(2): 168–176, ISSN: 2319-7692, 2319-7706.



- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E. (2009). AQUACROP The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description, *Agronomy Journal*, 101(3): 438, ISSN: 1435-0645, DOI: 10.2134/agronj2008.0140s.
- Schmidt, G.A., J.H. Jungclaus, C.M. Ammann, E. Bard, P. Braconnot, T.J. Crowley, G. Delaygue, F. Joos, N.A. Krivova, R. Muscheler, B.L. Otto-Bliesner, J. Pongratz, D.T. Shindell, S.K. Solanki, F. Steinhilber, And L.E.A. Vieira, (2012). Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.1). *Geosci. Model Dev.*, 5, 185-191, doi:10.5194/gmd-5-185-2012.
- SIACON. (2018). SISTEMA DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA DE CONSULTA. Recuperado de; https://www.gob.mx/siap/es/archivo/acciones_y_programas. Fecha de consulta; 01 de septiembre del 2018.
- 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, ISSN: 1435-0645, DOI: 10.2134/agronj2008.0139s.
- Stricevic, R.; Djurovic, N.; Vukovic, A.; Vujadinovic, M.; Cosic, M.; Pejic, B. (2014). Application of AQUACROP model for yield and irrigation requirement estimation of sugar beet under climate change conditions in Serbia, *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 59(3): 301-317, ISSN: 1450-8109, DOI: 10.2298/JAS1403301S.
- Trombetta, A.; Iacobellis, V.; Tarantino, E.; Gentile, F. (2016): Calibration of the AQUACROP model for winter wheat using MODIS LAI images. *Agricultural Water Management*, 164, Part 2: 304-316, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.10.013.
- Thornton. (2014). International Food Policy Research Institute (IFPRI) How does climate change alter agricultural strategies to support food security: <http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/ifpridp01340.pdf>. Fecha de consulta; 20 de mayo del 2014.