



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**PARAMETRIZACIÓN DEL
MODELO AQUACROP PARA LOS
PRINCIPALES CULTIVOS
AGRÍCOLAS BAJO RIEGO Y
TEMPORAL EN MÉXICO**

HILARIO FLORES GALLARDO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2023



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Parametrización del modelo AquaCrop para los principales cultivos agrícolas bajo riego y temporal en México**, realizada por el estudiante: **Hilario Flores Gallardo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. Héctor Flores Magdaleno

ASESOR

Dr. Juan Enrique Rubiños Panta

ASESOR

Dr. Roberto Ascencio Hernández

ASESORA

Dra. Nora Meraz Maldonado

ASESOR

Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, Febrero de 2023

PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA LOS PRINCIPALES CULTIVOS AGRÍCOLAS BAJO RIEGO Y TEMPORAL EN MÉXICO

Hilario Flores-Gallardo, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2023

RESUMEN

En México, se presenta una distribución amplia de las condiciones climáticas y edáficas, generando una clasificación de distintas zonas agroecológicas en las cuales se cultivan diversas especies anuales y perennes, con determinados requerimientos para producir bajo diferentes ciclos agrícolas y modalidades de producción, generando empleo y beneficios económicos para los productores. Debido a la variabilidad climática de dichas zonas y como consecuencia del cambio climático, el cual repercute en el desarrollo de los seres vivos, se requiere tener conocimiento e información sobre las características y variables que intervienen en la producción agrícola, para obtener rendimientos comercialmente viables con calidad y cantidad que permitan encaminar a la agricultura hacia la obtención de una seguridad y soberanía alimentaria nacional. Por lo anterior, en la presente investigación se realizó la parametrización del modelo AquaCrop en la región norte-centro de México, la cual enmarca información para las entidades federativas de Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila (La Laguna), Durango, y Sinaloa, con trabajos de campo para los cultivos de frijol (*Phaseolus vulgaris*), maíz (*Zea mays*), y papa (*Solanum tuberosum*). Los resultados podrán sentar las bases para replicarse en otras regiones de México, pues lo concerniente a la modelación del rendimiento y la simulación del crecimiento de los cultivos con el modelo AquaCrop, requiere de una menor cantidad de parámetros y variables en comparación con otros modelos biofísicos que han sido liberados para su utilización en sistemas computacionales. Por ello, se concluye que la implementación del modelo AquaCrop a gran escala es viable, siempre y cuando se obtengan los parámetros básicos de entrada para cada cultivo mediante observaciones realizadas en campo, permitiendo la generación de resultados confiables para pronosticar cosechas y tomar decisiones en beneficio del agro mexicano.

Palabras clave: AquaCrop, parámetros, riego, rendimiento, temporal (secano).

PARAMETERIZATION OF AQUACROP MODEL FOR THE MAIN AGRICULTURAL CROPS UNDER IRRIGATION AND RAINFED IN MEXICO

Hilario Flores-Gallardo, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2023

ABSTRACT

In Mexico, there is a wide distribution of climatic and edaphic conditions, generating a classification of different agro-ecological zones in which various annual and perennial species are cultivated, with many requirements to produce under different agricultural seasons and production modalities, generating employment and economic benefits for producers. Due to the climatic variability in these areas and climate change consequence, which affects the development of humankind, knowledge and information about the characteristics and variables involved in agricultural production is required, to obtain commercially viable yields with quality and quantity that allow agriculture to be directed towards obtaining national food security and sovereignty in the country. Therefore, in this research the parameterization of the AquaCrop model was carried out in the north-central region of Mexico, which frames information for the states of Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila (La Laguna), Durango, and Sinaloa, with fieldwork for crops of bean (*Phaseolus vulgaris*), maize (*Zea mays*), and potato (*Solanum tuberosum*). The results may have the groundwork for replication in other regions of Mexico, for concerning yield modeling and crop growth simulation with the AquaCrop model, requires fewer parameters and variables compared with other biophysical models that released for use in computer systems. Therefore, it's been concluded that the implementation of the AquaCrop model on large scale is viable, as long as the basic input parameters are obtained for each crop through field observations, allowing the generation of reliable results to forecast harvests and make decisions for the benefit of Mexican agriculture.

Keywords: AquaCrop, parameters, irrigation, yield, dry conditions (rainfed).

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por financiar una nueva etapa de mi formación académica que permita seguir desarrollando ciencia e investigación en favor del campo mexicano.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS), por las facilidades otorgadas en aula y en campo para adquirir nuevos conocimientos, por ende, para actualizar mis habilidades a través de su personal docente y de apoyo (campo y laboratorio).

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por brindarme la oportunidad de continuar con mi proceso de formación académica con su programa de capacitación para el personal investigador, sobre todo, por todas las facilidades otorgadas para obtener la mayor parte de la información que comprende la presente investigación.

A los integrantes de mi consejo particular: Dr. Héctor Flores Magdaleno, Dr. Juan Enrique Rubiños Panta, Dr. Roberto Ascencio Hernández, Dra. Nora Meraz Maldonado y Dr. Jorge Víctor Prado Hernández. *“Por su apoyo y confianza, lo cual generó la cristalización de este proyecto de investigación y sus resultados”*

A todo el personal del Postgrado en Hidrociencias, ubicado en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, por apoyarme para realizar diversas actividades enmarcadas en mi plan de estudios y los trámites correspondientes para la culminación de mi etapa como estudiante de doctorado.

También deseo mencionar un agradecimiento especial al Sr. J. Santos de la Cruz Frutero Hernández y al Sr. Juan Ávila Alsibar. *“Por su tiempo, experiencias y sus consejos”*

DEDICATORIAS

Esta tesis la dedico a toda mi familia, pero especialmente a mi Esposa: **Fabiola Zavala Estrada**, y a mi Hijo: **Fernando Enrique Flores Zavala**. *“Quiero expresarles que este logro también es de ustedes y espero que sea un ejemplo de superación a seguir”*

A mi Madre: **Reyna Elena Gallardo Camacho**, a mi Padre: **Hilario Flores Murguía**, a mi hermana: **Paola Flores Gallardo** y a mi hermano: **Pedro Enrique Flores Gallardo**. *“Muchas gracias por brindarme su apoyo, por su gran esfuerzo y por su sacrificio a pesar de la distancia, lo cual ha sido parte fundamental para llegar a la conclusión de un ciclo más de mi preparación académica”*

De forma especial para la nueva integrante de la familia, mi sobrina hermosa: **Zoe Marie**.

En recuerdo amoroso de mi suegra: **María Amparo Estrada Moratilla**. *“Fuiste como una segunda madre durante el tiempo que se cruzaron nuestras vidas en el Estado de México, se te extraña demasiado, pero eres recordada con mucho amor”*

A la memoria de un buen amigo: **Dr. Francisco Gavi Reyes**. *“Hasta donde te encuentres mi futuro vecino, este trabajo es resultado de tu confianza hacia mi persona”*

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIAS	vi
LISTAS DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO I. SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO DE FRIJOL CULTIVADO BAJO TEMPORAL CON EL MODELO AQUACROP	5
1.1 RESUMEN.....	5
1.2 ABSTRACT	6
1.3 INTRODUCCIÓN.....	7
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
1.4.1 Localización del área de estudio y sitios experimentales	9
1.4.2 Descripción de las ecuaciones principales del modelo AquaCrop	11
1.4.3 Análisis estadístico de los datos observados y simulados.....	13
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
1.5.1 Rendimiento observado y simulado	18
1.5.2 Fenología observada en campo vs. simulación.....	21
1.6 CONCLUSIONES.....	22
CAPÍTULO II. MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PAPA EN EL NORTE DE SINALOA CON AQUACROP	24
2.1 RESUMEN.....	24
2.2 ABSTRACT	25
2.3 INTRODUCCIÓN.....	26
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
2.4.1 Localización del área de estudio.....	27
2.4.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop	29
2.4.3 Análisis estadístico de los datos y tratamientos	30
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
2.5.1 Rendimiento observado y simulado	31

2.5.2 Fenología observada en campo vs. simulación.....	33
2.6 CONCLUSIONES.....	38
CAPÍTULO III. MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE FORRAJE Y GRANO	
DE MAÍZ CULTIVADO BAJO RIEGO CON EL MODELO AQUACROP	39
3.1 RESUMEN.....	39
3.2 ABSTRACT	40
3.3 INTRODUCCIÓN.....	41
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
3.4.1 Localización, características climáticas y edáficas del área de estudio	42
3.4.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop	43
3.4.3 Análisis estadístico.....	45
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
3.6 CONCLUSIONES.....	49
CONCLUSIONES GENERALES.....	51
LITERATURA CITADA	52

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Inclusión de cultivos parametrizados en el catálogo del modelo AquaCrop conforme a su evolución a través de los años.	2
Cuadro 1.1. Ubicación y fechas de siembra de los sitios establecidos con frijol en Durango, México.	9
Cuadro 1.2. Propiedades y clases texturales de los sitios establecidos con frijol en Durango, México (USDA, 2018).....	10
Cuadro 1.3. Localización y uso de información climática obtenida de las estaciones agrometeorológicas automatizadas.	11
Cuadro 1.4. Resultados del rendimiento de grano observados en campo y simulados con AquaCrop.	18
Cuadro 1.5. Resultados del rendimiento de grano observados en campo y simulados con AquaCrop.	20
Cuadro 1.6. Parámetros conservativos y adaptados del modelo AquaCrop para simular el rendimiento de frijol bajo condiciones de temporal.	21
Cuadro 2.1. Parcelas de productores cooperantes con las variedades de papa: ‘Alpha’, ‘Atlantic’, ‘Mundial’ y ‘FL1867’.....	28
Cuadro 2.2. Parámetros conservativos de referencia con un experimento de papa realizado en Lima, Perú.	30
Cuadro 2.3. Fenología <i>Oi</i> y <i>Si</i> en papa correspondiente a la variedad ‘Alpha’.	34
Cuadro 2.4. Fenología <i>Oi</i> y <i>Si</i> en papa correspondiente a la variedad ‘Atlantic’.....	34
Cuadro 2.5. Fenología <i>Oi</i> y <i>Si</i> en papa correspondiente a la variedad ‘Mundial’.	35
Cuadro 2.6. Fenología <i>Oi</i> y <i>Si</i> en papa correspondiente a la variedad ‘FL1867’.....	35
Cuadro 3.1. Características de los materiales de maíz utilizados en Durango durante los ciclos agrícolas P-V 2015, 2016 y 2017.	42
Cuadro 3.2. Propiedades físicas y químicas del suelo.....	43
Cuadro 3.3. Parámetros conservativos del modelo AquaCrop basados en resultados de otras regiones agrícolas (Hsiao <i>et al.</i> , 2009; Flores-Gallardo <i>et al.</i> , 2013).	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las versiones del modelo AquaCrop a través del tiempo (2009-2022).	1
Figura 1.1. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Canatlán durante el ciclo P-V 2013.....	14
Figura 1.2. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Durango durante el ciclo P-V 2013.....	15
Figura 1.3. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Madero durante el ciclo P-V 2013.	15
Figura 1.4. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Canatlán y productor cooperante en el ciclo P-V 2014.....	16
Figura 1.5. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Durango durante el ciclo P-V 2014.....	16
Figura 1.6. Registro de la Pp en el sitio de Lázaro Cárdenas durante el ciclo P-V 2014.	17
Figura 1.7. Registro de la Pp en el sitio de Peñón Blanco durante el ciclo P-V 2014.....	17
Figura 1.8. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de rendimiento de grano O_i y S_i con el modelo AquaCrop.	19
Figura 1.9. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de biomasa (B) O_i y S_i con el modelo AquaCrop.	20
Figura 1.10. Comportamiento fenológico observado en campo (O_i) en comparación con la fenología simulada (S_i) con AquaCrop.	22
Figura 2.1. Distribución de la red de estaciones agrometeorológicas del DR-075 (adaptado de Flores-Magdaleno et al., 2014).	29
Figura 2.2. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de rendimiento de tubérculo O_i y S_i con el modelo AquaCrop.	32
Figura 2.3. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de biomasa (B) O_i y S_i con el modelo AquaCrop.	33
Figura 2.4. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (O_i) en comparación con la fenología simulada (S_i) con AquaCrop en la variedad ‘Alpha’.....	36
Figura 2.5. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (O_i) en comparación con la fenología simulada (S_i) con AquaCrop en la variedad ‘Atlantic’.	36
Figura 2.6. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (O_i) en comparación con la fenología simulada (S_i) con AquaCrop en la variedad ‘Mundial’.	37
Figura 2.7. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (O_i) en comparación con la fenología simulada (S_i) con AquaCrop en la variedad ‘FL1867’.	37

Figura 3.1. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de rendimiento de grano O_i y S_i con el modelo AquaCrop.....	46
Figura 3.2. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de $B O_i$ y $B S_i$ con el modelo AquaCrop.	47
Figura 3.3. Comportamiento de la fenología del maíz expresada en $^{\circ}D$, observada en campo (O_i) y simulada (S_i) con el modelo AquaCrop.	48
Figura 3.4. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (O_i) y simulado (S_i) con AquaCrop expresado en porcentaje en comparación con la fenología del maíz.	49

INTRODUCCIÓN GENERAL

El modelo AquaCrop fue desarrollado y liberado por primera ocasión en 2009 (Raes *et al.*, 2009) por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO, por sus siglas en inglés), desde entonces ha sido actualizado de forma regular con nuevas versiones (Figura 1) y ampliamente utilizado en diferentes condiciones agroecológicas de todo el mundo.

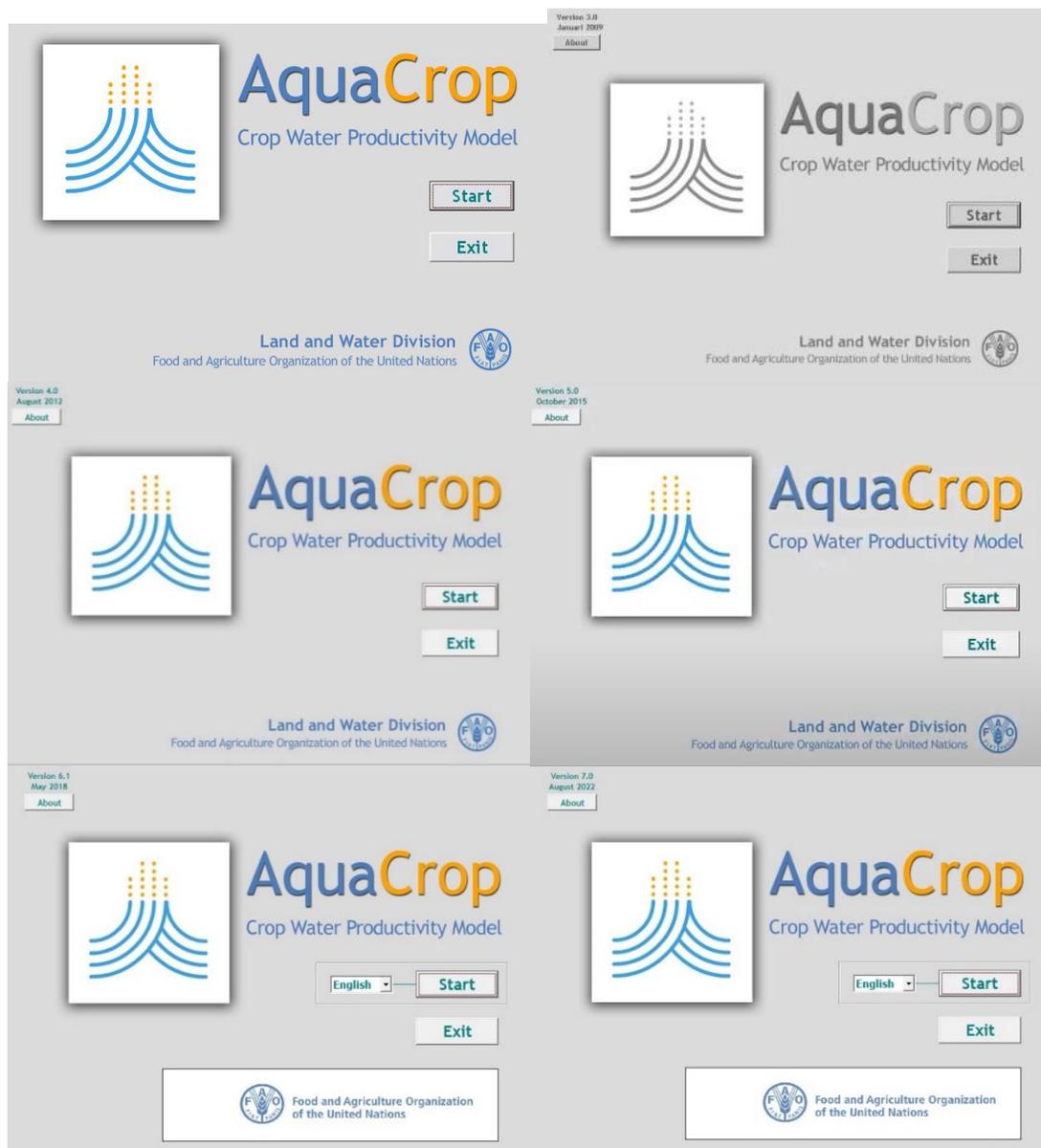


Figura 1. Evolución de las versiones del modelo AquaCrop a través del tiempo (2009-2022).

Un dato importante por mencionar es que la primera versión de AquaCrop fue la 1.0, sin embargo, en ese mismo año 2009 fue actualizado hasta la versión 3.0, posteriormente y a partir de la versión 3.1plus, su actualización fue de mayor prolongación entre los períodos de tiempo con excepción de 2018, donde se tuvo en el mismo año una actualización de la 6.0 hasta la 6.1 (Cuadro 1)

Cuadro 1. Inclusión de cultivos parametrizados en el catálogo del modelo AquaCrop conforme a su evolución a través de los años.

Número de cultivos	Versión					
	1.0-3.0 (2009)	3.1plus (2011)	4.0 (2012)	5.0 (2015)	6.0-6.1 (2018)	7.0 (2022)
1	Algodón	Algodón	Algodón	Algodón	Algodón	Alfalfa
2	Arroz	Arroz con cascara	Arroz con cascara	Arroz con cascara	Arroz con cascara	Algodón
3	Maíz	Girasol	Caña de azúcar	Caña de azúcar	Caña de azúcar	Arroz con cascara
4	Papa	Maíz	Cebada	Cebada	Cebada	Caña de azúcar
5	Quínoa	Papa	Girasol	Girasol	Frijol	Cebada
6	Remolacha	Quínoa	Maíz	Maíz	Girasol	Frijol
7	Soya	Remolacha	Papa	Papa	Maíz	Girasol
8	Trigo	Soya	Quínoa	Quínoa	Papa	Maíz
9		Tomate rojo (jitomate)	Remolacha	Remolacha	Quínoa	Mandioca
10		Trigo	Soya	Soya	Remolacha	Papa
11			Tomate rojo (jitomate)	Tomate rojo (jitomate)	Sorgo	Quínoa
12			Trigo	Trigo	Soya	Remolacha
13					Tomate rojo (jitomate)	Sorgo
14					Trigo	Soya
15						Tef
16						Tomate rojo (jitomate)
17						Trigo

Se considera que AquaCrop es un modelo de simulación de crecimiento de los cultivos, con el propósito de mejorar la productividad del agua (*PA*) bajo condiciones de riego y también de temporal (secano). Lo anterior se debe porque simula la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, en su mayoría de tipo herbáceos, pero también considera en su catálogo de cultivos a los de tipo leñosos, siendo particularmente adaptado para las condiciones donde el agua es un factor limitante en la producción agrícola (Steduto *et al.*, 2012).

El modelo AquaCrop puede utilizarse por profesionistas del servicio de extensionismo agrícola, agencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y asociaciones de agricultores, puesto que es una herramienta de planificación que ayuda en la toma de decisiones sobre el manejo agronómico de los cultivos sembrados bajo la modalidad de riego y temporal (Stricevic *et al.*, 2011). Sin embargo, su utilización como herramienta de análisis ha sido de mayor implementación para la determinación de la productividad de los cultivos considerando el agua como principal suministro (FAO, 2017).

Es importante mencionar que el modelo AquaCrop utiliza un número relativamente pequeño de parámetros y variables que requieren métodos simples para su determinación en comparación con otros modelos de su mismo tipo (Flores-Gallardo *et al.*, 2015), la ventaja del modelo AquaCrop es la simplicidad que representa en su utilización para diferentes condiciones y localidades (Porrás-Jorge *et al.*, 2020).

Por otra parte, los procedimientos de cálculo se basan en procesos biofísicos fundamentales y generalmente complejos, lo que garantiza la precisión de los resultados de la simulación del cultivo ante la respuesta de la planta en la relación agua-suelo-planta-atmósfera (RASPA). Los resultados de la simulación con el modelo AquaCrop se pueden traducir en recomendaciones prácticas para aumentar la *PA* de los cultivos, puesto que el modelo estima la biomasa (*B*) y el rendimiento (*Y*) esperado de los cultivos para una región agrícola específica, la cual puede contar con un ambiente y clima determinado. El modelo AquaCrop también ofrece un indicador que evalúa el desempeño del sistema agrícola con relación al agua, a través de la *PA* o el *Y* que produce por unidad de agua evapotranspirada (FAO, 2017).

Los modelos de simulación son herramientas importantes e interdisciplinarias debido a que tienen en la actualidad varias aplicaciones potenciales en respuesta con los temas relacionados a la

investigación, con el manejo de cultivos y en la planificación (Candelaria *et al.*, 2011). Por lo tanto, los modelos constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, también sobre su crecimiento y, sobre todo, en sus rendimientos (Gálvez *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2009).

No obstante, la utilización de los modelos de simulación como una herramienta implica la utilización de información obtenida a través de experiencias previas durante años, temporadas o ciclos agrícolas de cultivos, lo cual permite proyectar resultados físicos y económicos, teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente o área de estudio (Fullana y Urquía, 2009). Ante la variabilidad climática y la complejidad de los sistemas de producción agrícola, los modelos de simulación se presentan en la actualidad como una alternativa para ser empleados particularmente bajo diferentes escenarios de manejo agronómico y de clima (Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

En la presente investigación se realizó la parametrización del modelo AquaCrop en la región norte-centro de México, la cual comprende sitios para las entidades federativas de Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila (La Laguna), Durango, y Sinaloa, con trabajos de campo para los cultivos de frijol (*Phaseolus vulgaris*), maíz (*Zea mays*) y papa (*Solanum tuberosum*). Por lo anterior, cada cultivo está desarrollado como un capítulo con el formato de un artículo científico, el cual incluye los siguientes apartados de estructura y formato: Introducción, Materiales y métodos, Resultados y discusión, Conclusiones y Literatura citada.

CAPÍTULO I. SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO DE FRIJOL CULTIVADO BAJO TEMPORAL CON EL MODELO AQUACROP

1.1 RESUMEN

La agricultura desarrollada bajo condiciones de temporal (secano) cubre la mayor superficie a nivel mundial y nacional. Por lo tanto, se requieren herramientas como los modelos de simulación del crecimiento y rendimiento de los cultivos, que operan con datos climáticos, edáficos, fenología y manejo agronómico, lo cual permite orientar a los productores agrícolas con asesoría técnica sobre el rendimiento esperado y potencial en un área agrícola específica. Actualmente en México, la utilización de modelos de simulación es limitada por la cantidad de parámetros requeridos y la información específica que se requiere obtener en campo de forma integral y veraz. En la presente investigación se parametrizó 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. Para calibrar y validar el modelo se compararon los datos observados y simulados sobre la cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa y rendimiento de grano en la cosecha, utilizando datos experimentales de parcelas semi-comerciales ubicadas en los campos experimentales del INIFAP y, además, se utilizaron parcelas comerciales de productores cooperantes establecidas en zonas representativas de Durango. Los resultados indicaron que las predicciones del rendimiento de grano del modelo son buenas con un valor 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*) con 0.11. El modelo AquaCrop es una alternativa viable con su previa calibración y validación, para conocer el rendimiento esperado y potencial del cultivo de frijol producido bajo condiciones de temporal.

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

1.2 ABSTRACT

Agriculture developed under rainfed conditions covers the largest area globally and nationally. Therefore, tools such as crop growth and yield simulation models are required, which work with information of climate data, edaphic conditions, phenology, and agronomic management, allowing the orientation of agricultural producers with technical advice on the expected and potential yield at specific agricultural area. Currently in Mexico, the use of simulation models is limited due to the number of parameters required and the specific information required to obtain in the field of integral and truthful way. In the present research, the AquaCrop model was parameterized to simulate the yield of the pinto bean *cv.* 'Centauro' grown under rainfed conditions in the state of Durango, Mexico, during the spring-summer (S-S) growing seasons 2013 and 2014. To calibrate and validate the model, the observed and simulated data on canopy cover, biomass production and grain yield in the harvest time were compared, using experimental data from semi-commercial plots located in the experimental stations of INIFAP and commercial plots of cooperating producers established in representative areas of Durango. The results indicated that grain yield predictions with the model are good, with a value of 0.18 t ha⁻¹ for the root mean square error (*RMSE*) and a Willmott index (*d*) of 1.0, a determination coefficient (*R*²) of 0.94, a standard deviation (*σ*) of 0.10 and a variation coefficient (*CV*) with 0.11. The AquaCrop model is a viable alternative with its previous calibration and validation, to know the expected yield and potential of the bean crop produced under rainfed conditions.

Keywords: Calibration, *Phaseolus vulgaris*, rainfed, validation.

1.3 INTRODUCCIÓN

Una de las principales limitantes en la producción agrícola bajo la modalidad de temporal (secano) es la susceptibilidad a la variabilidad climática, pero existe la necesidad del suministro de agua a través de 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 temporal es escasa y errática (Flores-Gallardo *et al.*, 2014). No obstante, la disponibilidad irregular de agua es un problema aún en zonas con alta precipitación (Wanjura y Upchurch, 2000). La escasez de agua es la mayor limitante para la producción agrícola, particularmente en las zonas áridas y semiáridas (Farooq *et al.*, 2017). Sin embargo, el estrés por sequía es uno de los principales factores abióticos que representa una limitante para la producción de cultivos en todo el mundo debido a que afecta el crecimiento y el 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 a su ocurrencia, pero de forma específica durante las etapas reproductivas y durante el desarrollo del grano (sequía terminal) se considera más crítica porque ocasiona una pérdida significativa en el rendimiento (Farooq *et al.*, 2017).

En México se cuenta con una superficie cultivable de 32.4 millones de hectáreas (ha) aproximadamente, aunque durante el año 2021 se registraron solamente 21.5 millones de ha (SIAP, 2022a), de las cuales corresponden 6.8 millones de ha (21%) a la modalidad de riego y el 79% (25.6 millones de ha) a la modalidad de temporal (CONAGUA, 2022). El frijol (*Phaseolus vulgaris*) se produce en todo el territorio nacional en sus diferentes clases comerciales, principalmente 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), con cuya comercialización les permite generar beneficios económicos a los productores agrícolas (Borja-Bravo *et al.*, 2018). A nivel nacional, los principales estados productores de frijol son Zacatecas en la modalidad de temporal y Sinaloa con la modalidad de riego (SIAP, 2022b). El frijol presenta un bajo requerimiento hídrico que oscila entre los 400 a 631 mm (Villordo-Pineda *et al.*, 2015; Rosales-Serna *et al.*, 2016) pero también cuenta con diferentes mecanismos de tolerancia y resistencia al estrés hídrico que permiten catalogarla como una especie que se cultiva en regiones carentes de insumos naturales y que son esenciales para su desarrollo. El agua es uno de los

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

Debido a la compleja respuesta de los cultivos a las variaciones en el déficit hídrico, usualmente se recurre al uso de funciones empíricas para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico, aplicado durante una parte o en la totalidad del ciclo del cultivo (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Por lo anterior, el uso de los modelos matemáticos de simulación biológica resulta viable para estimar la producción potencial e identificar factores limitantes de la producción o para analizar cambios en el manejo hídrico de los cultivos (López-Cruz *et al.*, 2005). La utilización de modelos para la simulación del crecimiento y rendimiento de los cultivos en México es limitada porque no existe disponibilidad total de la información requerida para su alimentación, de modo que no se realiza su calibración ni validación, en algunos casos si existen datos, pero incompletos o con baja calidad que resultan poco confiables para su utilización. Sin embargo, se han reportado algunos trabajos realizados en México con el modelo AquaCrop para maíz bajo riego en la zona norte del estado de Sinaloa, México (Flores-Gallardo *et al.*, 2013) y para estudiar cultivos establecidos bajo temporal con escenarios de cambio climático (Arce-Romero *et al.*, 2020) pero sin ninguna verificación de los resultados simulados con datos experimentales en el último caso.

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-Gallardo *et al.*, 2015; Raes *et al.*, 2022), puesto que funciona como una herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos y localidades (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Este modelo determinístico está orientado a usuarios con limitados conocimientos computacionales, es simple sin perder exactitud porque usa un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes *et al.*, 2009b).

En esta investigación se parametrizó el modelo AquaCrop con datos experimentales obtenidos en áreas representativas donde se cultiva frijol de temporal en el estado de Durango, México, para estudiar el desempeño del modelo en la simulación del crecimiento y rendimiento del cultivo en diferentes fechas de siembra de acuerdo con las condiciones climáticas predominantes de cada

sitio experimental. 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.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 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 establecida en el estado de Durango, México, comprendiendo 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. Para lo cual, se establecieron seis sitios experimentales durante el ciclo primavera-verano (P-V) 2013 y 2014 en áreas representativas de producción del cultivo de estudio. Para ello, se utilizaron parcelas semi-comerciales ubicadas en los campos experimentales del INIFAP y parcelas comerciales de productores cooperantes (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Ubicación y fechas de siembra de los sitios establecidos con frijol en Durango, México.

Sitio	Coordenadas geográficas		Altitud (m)	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.

La variedad de frijol pinto que se utilizó en la siembra de los sitios fue 'Centauro' (Rosales-Serna *et al.*, 2012), la cual se caracteriza por tener un rendimiento similar, pero de mayor precocidad en comparación con la variedad de frijol pinto 'Saltillo' que se considera como la más popular entre los productores agrícolas de frijol producido bajo condiciones de temporal (Sánchez-Valdez *et al.*, 2004; Rosales-Serna *et al.*, 2014).

La densidad de población promedio utilizada en la siembra fue de 87,500 plantas ha⁻¹, lo cual varía por el tipo de sembradora utilizada en las diferentes regiones productoras de frijol, debido a que miden la distribución generalmente en peso (45 kg ha⁻¹ de semilla). Sin embargo, tratan de apegarse al mismo arreglo topológico con el establecimiento de 0.8 m de separación entre surcos para realizar el mejor manejo agronómico posible y que se puede realizar conforme a las condiciones topográficas y propiedades físicas de los suelos que ofrece cada parcela (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Propiedades y clases texturales de los sitios establecidos con frijol en Durango, México (USDA, 2018).

Sitio	Propiedades físicas					Clase textural
	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	M.O. (%)	ρ_a (g cm ⁻³)	
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; M.O. = Materia orgánica; ρ_a = Densidad aparente del suelo.

La información climática (Cuadro 1.3) se obtuvo de la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas (RENEAA) operada por el INIFAP (INIFAP, 2017), lo cual sirvió de base para consolidar los parámetros calibrados del modelo AquaCrop, los cuales fueron considerados como parámetros de entrada (densidad de población, productividad del agua, índice de cosecha, temperaturas umbrales, método para calcular los grados día y expansión inicial del dosel vegetal) utilizando datos del experimento obtenidos en campo, para esto último se validó el modelo con datos de las parcelas semi-comerciales de frijol establecidas en los ciclos agrícolas P-V 2013 y 2014, considerando las características de la variedad y la densidad de población utilizada.

Cuadro 1.3. Localización y uso de información climática obtenida de las estaciones agrometeorológicas automatizadas.

Sitio	Coordenadas geográficas		Nombre de la estación
	Norte (N)	Oeste (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; N/A = No aplica porque no se sembró.

1.4.2 Descripción de las ecuaciones principales 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). La siguiente ecuación empírica se utiliza para evaluar la respuesta del rendimiento al agua:

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = Ky \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (1)$$

En donde Y_x e Y son el rendimiento máximo y real, $\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right)$ es la disminución relativa del rendimiento, ET_x y ET son la evapotranspiración máxima y real, $\left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right)$ es el agua relativa al estrés, y Ky es un factor de proporcionalidad entre la disminución relativa del rendimiento y la reducción relativa de la evapotranspiración.

De acuerdo con Raes *et al.* (2009a), el modelo AquaCrop en su primera versión contó con ocho cultivos parametrizados y actualmente tiene 17 cultivos en su catálogo (Raes *et al.*, 2022). Por ello, consta de varias ecuaciones que simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo mediante la utilización de información de entrada, tal como: clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización, nivel de déficit hídrico, sistema de riego, etc. Sin embargo, se detalla que el modelo AquaCrop requiere específicamente de la siguiente información climática a nivel diario, decenal o mensual: temperatura máxima ($T_{máx}$), temperatura mínima

($T_{mín}$), precipitación (Pp), evapotranspiración de referencia (ET_o) y, además, considera como referencia una concentración media anual de CO_2 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 2057, esto último dependerá del escenario de emisiones. En efecto, los valores de la concentración de este gas han sido actualizados de acuerdo con los escenarios de cambio climático vigentes, (Representative Concentration Pathways, RCP por sus siglas en inglés). La producción de biomasa y de grano depende de varios parámetros del cultivo: conductancia estomatal, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua (PA) e índice de cosecha (Hi), pero la ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo (Y) se presenta en la siguiente ecuación:

$$Y = B * Hi * f_{Hi} \quad (2)$$

En donde B es la biomasa del cultivo, Hi es el índice de cosecha que depende de la variedad o híbrido del cultivo y f_{Hi} es un multiplicador que considera las tensiones de ajuste del índice de cosecha a partir de su valor de referencia. Cabe mencionar que el ajuste del índice de cosecha a los déficits de agua y la temperatura del aire depende del momento y la extensión del estrés durante el ciclo de cultivo. El efecto del estrés en el índice de cosecha puede ser positivo ($f_{Hi} > 1$) o negativo ($f_{Hi} < 1$). Se hace una diferencia entre las tensiones antes del inicio y durante la formación del fruto (factor que determina el rendimiento) pero también durante la floración que pueden afectar la polinización.

El modelo AquaCrop ajusta el crecimiento del dosel vegetal (CC) con respecto a la densidad de población (plantas ha^{-1}) en caso de carecer de información experimental sobre la cobertura vegetal requerida, por ello es posible estimarla a partir de datos índice de área foliar (IAF) con la siguiente ecuación:

$$CC = 1.005 [1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2} \quad (3)$$

Para el cálculo de los grados día ($^{\circ}D$) a nivel diario, se considera la $T_{mín}$ y $T_{máx}$ como las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dichos umbrales establecen un adecuado desarrollo de la planta. Por lo tanto, las temperaturas de desarrollo del frijol que asume el modelo AquaCrop para estimar los $^{\circ}D$, son de $9^{\circ}C$ y $30^{\circ}C$, para $T_{mín}$ y $T_{máx}$, respectivamente, pero debido a que la zona de estudio es árida, se ajustó la $T_{mín}$ con un valor de $8^{\circ}C$ y para la

simulación del crecimiento del cultivo de frijol, se utilizaron los parámetros conservativos predeterminados del modelo AquaCrop con su único ajuste en la densidad de población y manejo agronómico.

1.4.3 Análisis estadístico de los datos observados y simulados

Una vez realizada la parametrización, se procedió a la calibración y validación del modelo AquaCrop con los datos obtenidos en campo, aplicando el análisis estadístico de los datos de rendimiento y duración del ciclo del cultivo observados en campo y simulados (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Para lo anterior, se utilizaron los siguientes análisis estadísticos: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) y el índice de Willmott (*d*) de acuerdo con (Willmott, 1982), calculados con las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = [n^{-1} \sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si| + |Oi|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (5)$$

En donde *n* es el número de observaciones realizadas, *Si* y *Oi* son los valores simulados y observados, respectivamente. Debido a que *RMSE* representa una medida global entre los valores observados y simulados, es considerado como un indicador de la incertidumbre porque toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un buen desempeño en la simulación. El valor *d* (ecuación 5) varía desde cero hasta uno y, por lo cual, ambos análisis fueron aplicados de forma secuencial a los datos observados y simulados. Por último, con la finalidad de comparar estadísticamente los valores *Si* contra los valores *Oi*, se utilizaron los siguientes análisis estadísticos: coeficiente de variación (*CV*) y desviación estándar (σ) calculados con las siguientes ecuaciones:

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2} \quad (7)$$

Donde σ es la desviación estándar, \bar{x} es el valor medio, y x_i es cada observación registrada.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido al requerimiento hídrico durante el ciclo del cultivo y con la precipitación ocurrida, el rendimiento del cultivo fue afectado y favorecido de acuerdo con las condiciones que se presentaron en cada sitio donde se establecieron las parcelas de frijol, con variaciones en los registros de esta variable entre 215.4 a 376.9 mm durante los ciclos agrícolas P-V 2013 y 2014 (Figura 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7).

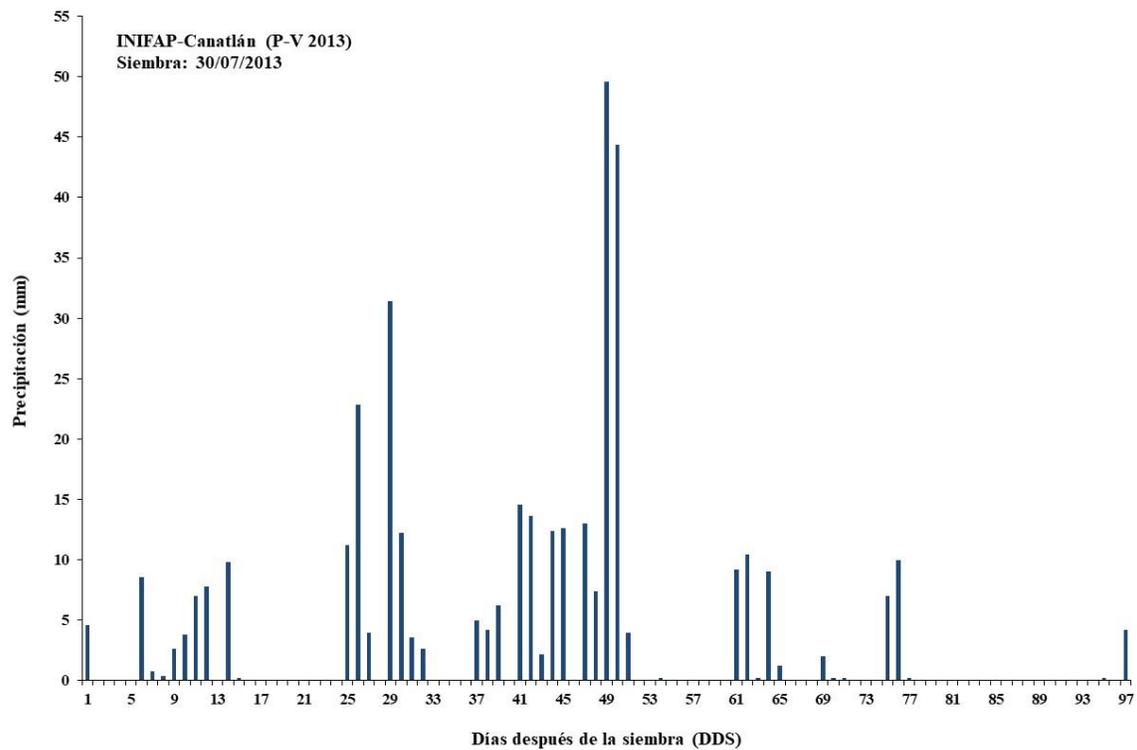


Figura 1.1. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Canatlán durante el ciclo P-V 2013.

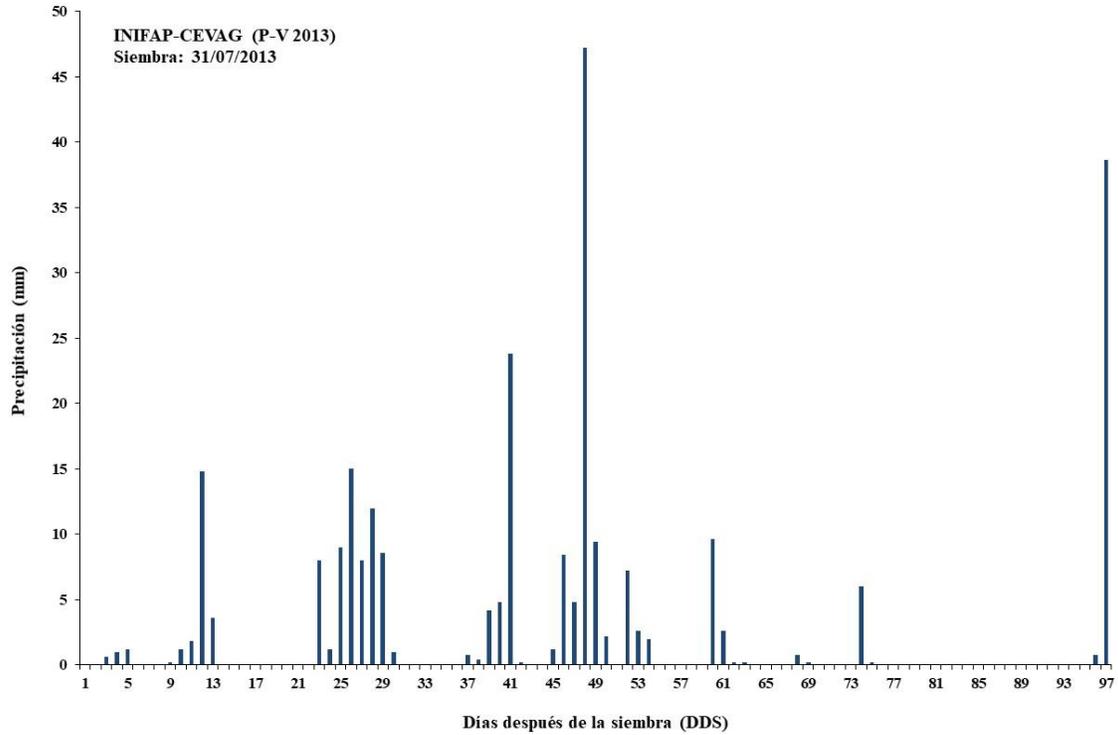


Figura 1.2. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Durango durante el ciclo P-V 2013.

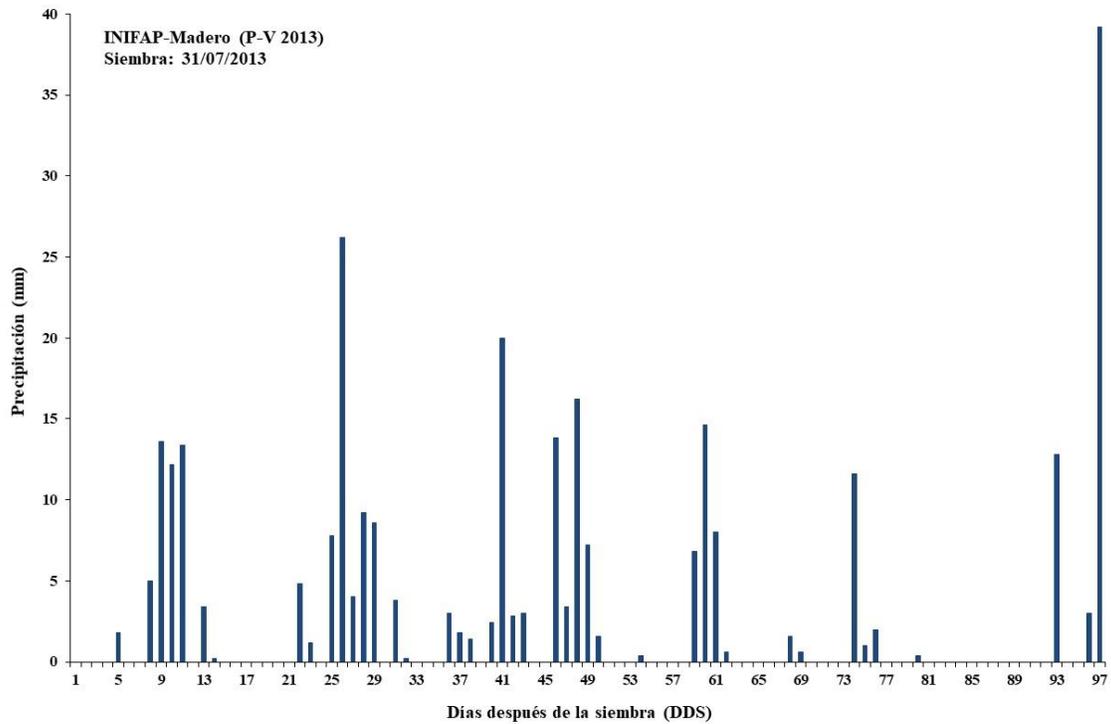


Figura 1.3. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Madero durante el ciclo P-V 2013.

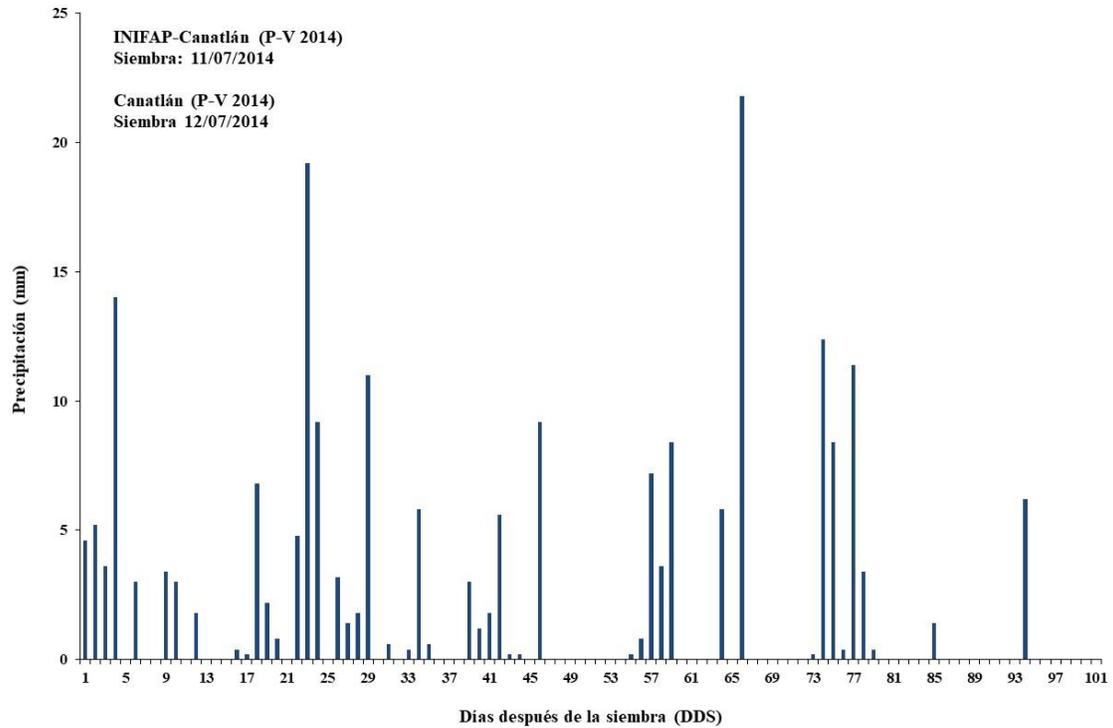


Figura 1.4. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Canatlán y productor cooperante en el ciclo P-V 2014.

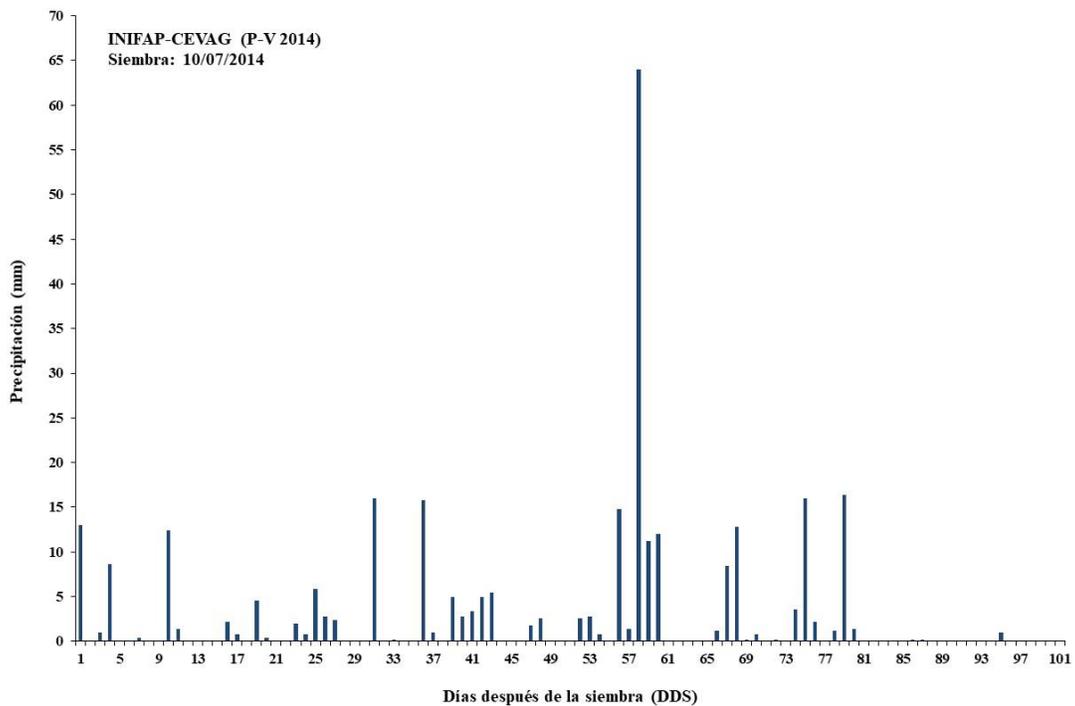


Figura 1.5. Registro de la Pp en el sitio INIFAP-Durango durante el ciclo P-V 2014.

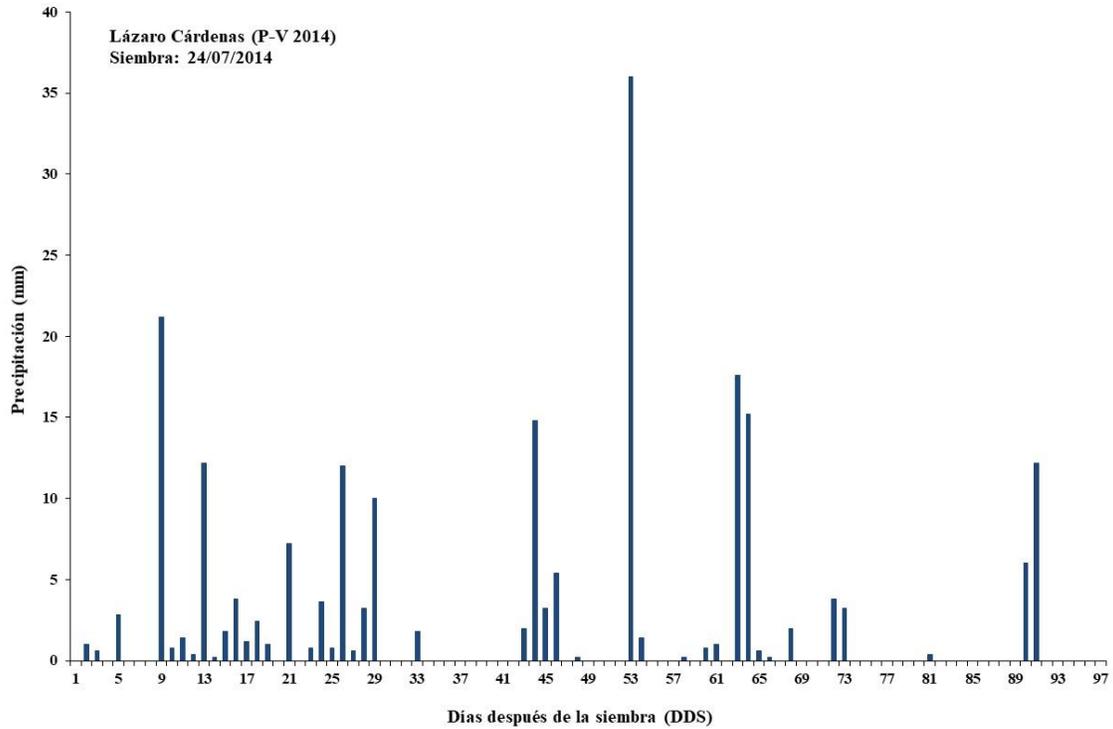


Figura 1.6. Registro de la Pp en el sitio de Lázaro Cárdenas durante el ciclo P-V 2014.

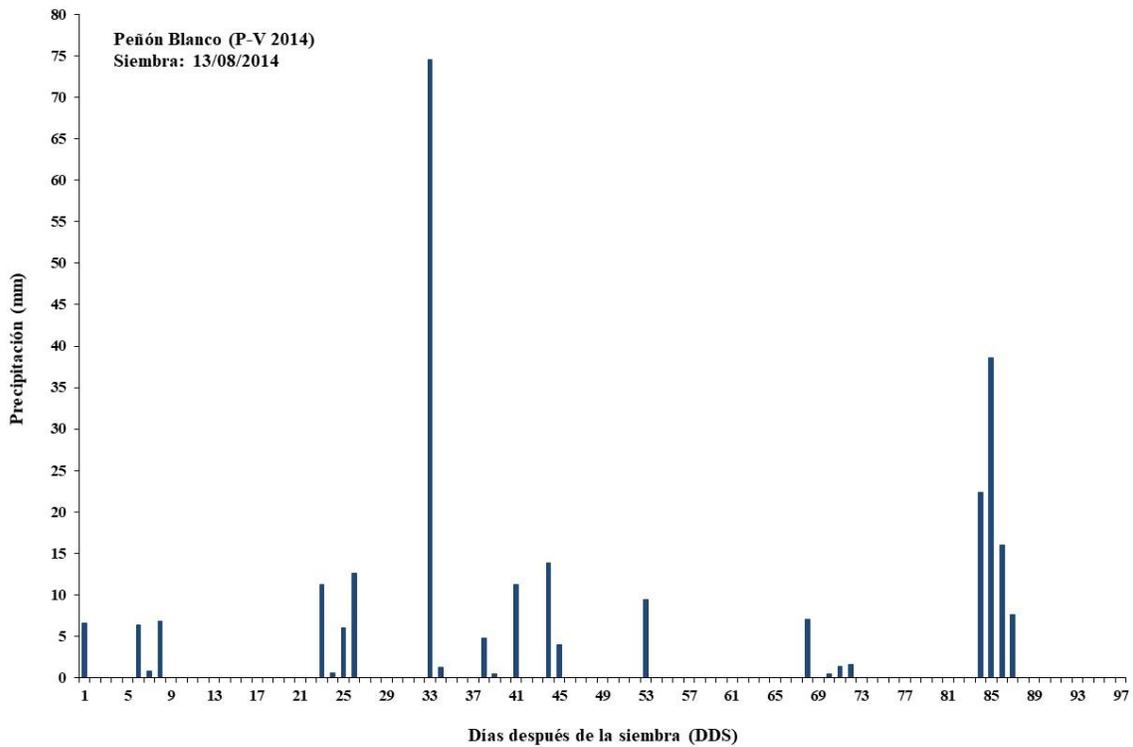


Figura 1.7. Registro de la Pp en el sitio de Peñón Blanco durante el ciclo P-V 2014.

1.5.1 Rendimiento observado y simulado

De acuerdo con Flores-Gallardo *et al.* (2014), a pesar de la importancia alimenticia y productiva del frijol en Durango, 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 esperados y se requieren 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 IAF , Hi , rendimiento de la B y grano (Tsimbaa *et al.*, 2013).

En el Cuadro 1.4 se muestran los rendimientos de grano obtenidos durante los ciclos agrícolas P-V 2013 y 2014, incluyendo a 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, presentando cierta similitud en los resultados estadísticos con otro trabajo relacionado con frijol cultivado bajo riego (González-Robaina *et al.*, 2019).

Cuadro 1.4. Resultados del rendimiento de grano observados en campo y simulados con AquaCrop.

Sitio	σ	Rendimiento (t ha^{-1})	
		O_i	S_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

Una de las características que define 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 propio alimento y, sobre todo, 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 1.8), resultados similares a los reportados por Tornés *et al.* (2016b) y lo cual está sumamente relacionado con la producción de *B* (Cuadro 1.5, Figura 1.9), con un R^2 de 0.65 y lo cual, 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 importancia trascendente; 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 resultados de 2.4 t ha^{-1} en el rendimiento de grano (Tornés *et al.*, 2016a)

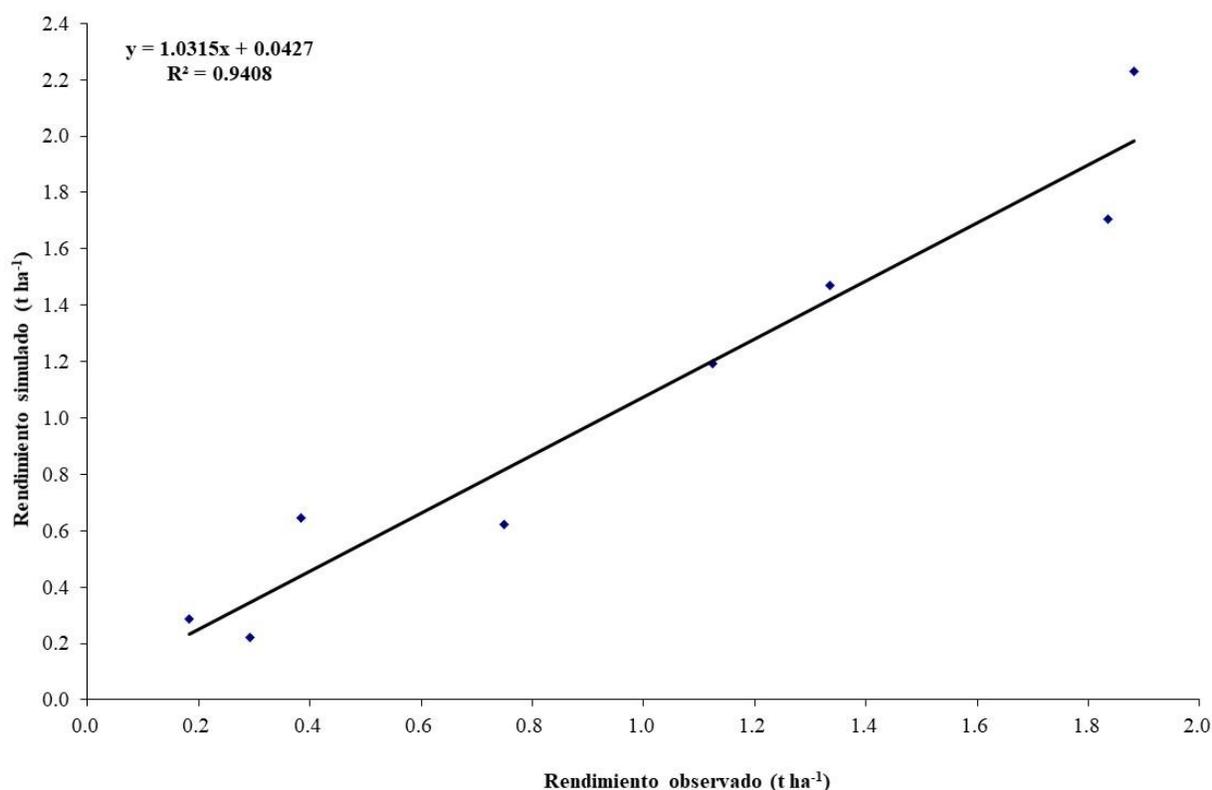


Figura 1.8. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de rendimiento de grano *Oi* y *Si* con el modelo AquaCrop.

Cuadro 1.5. Resultados del rendimiento de grano observados en campo y simulados con AquaCrop.

Sitio	σ	Biomasa ($t\ ha^{-1}$)	
		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

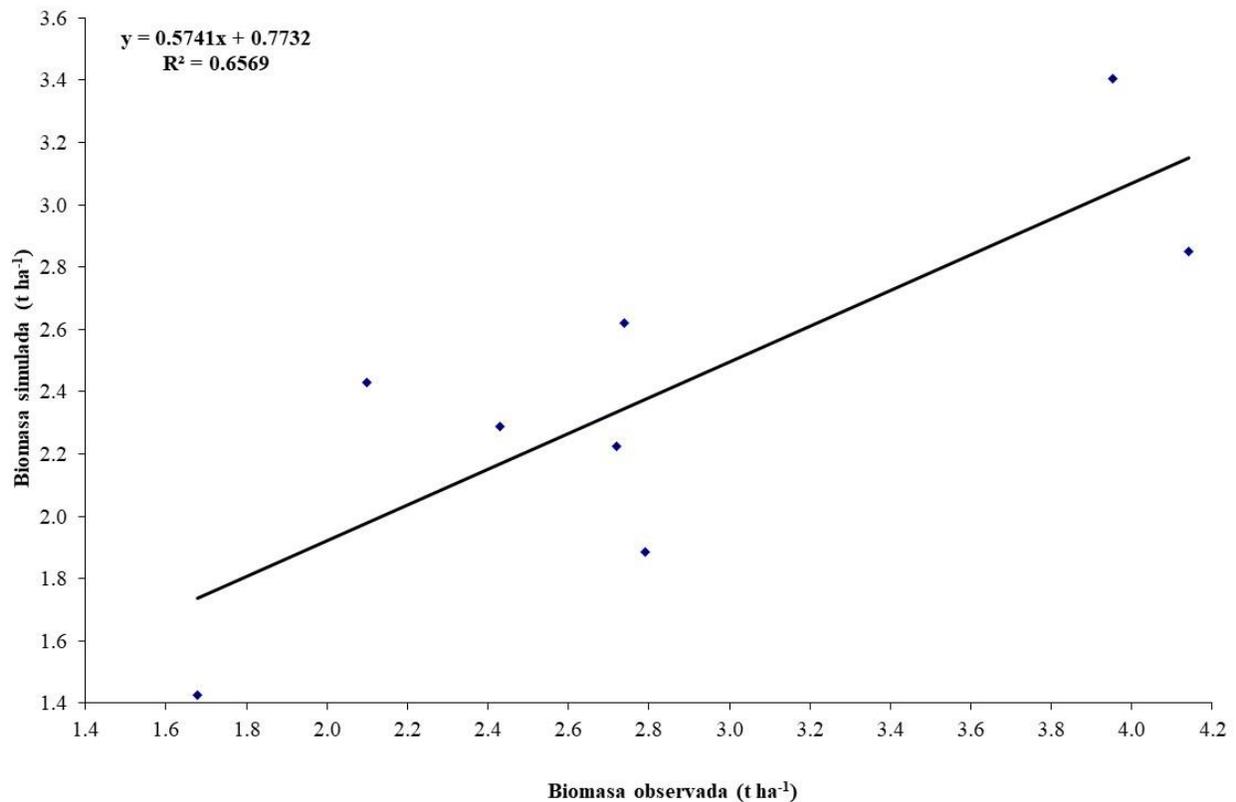


Figura 1.9. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de biomasa (B) O_i y S_i con el modelo AquaCrop.

1.5.2 Fenología observada en campo vs. simulación

Se ha comprobado que diferentes variedades de frijol cultivadas bajo riego presentan diferencias en tiempo y acumulación de los grados día ($^{\circ}D$) 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 y evitar contingencias por efectos del clima, puesto que en otras regiones agrícolas reportan una sensibilidad a las temperaturas y se manejan valores de 9 y 30 $^{\circ}C$ para la $T_{mín}$ y $T_{máx}$ (Raes *et al.*, 2022), 15 y 27 $^{\circ}C$ para la $T_{mín}$ y $T_{máx}$ en regiones más cálidas (Tornés *et al.*, 2016a). Los parámetros conservativos del modelo AquaCrop, fueron adaptados y modificados para simular las condiciones reales de los diferentes sitios de Durango (Cuadro 1.6). Por lo anterior, se llevó a cabo la calibración 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 respecto a lo simulado por el modelo AquaCrop (Figura 1.10).

Cuadro 1.6. Parámetros conservativos y adaptados del modelo AquaCrop para simular el rendimiento de frijol bajo condiciones de temporal.

Parámetro	Conservativo	Calibrado
Temperatura base ($^{\circ}C$) donde no se desarrolla el cultivo	9	8
Índice de cosecha de referencia (H_{io}) (%)	40	34

Parámetros de entrada	AquaCrop	Experimental
Densidad de población (plantas ha^{-1})	131579	87500
$^{\circ}D$: de la siembra a la emergencia	59	69.80
$^{\circ}D$: desde la siembra hasta la madurez	1298	1010.68
$^{\circ}D$: 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

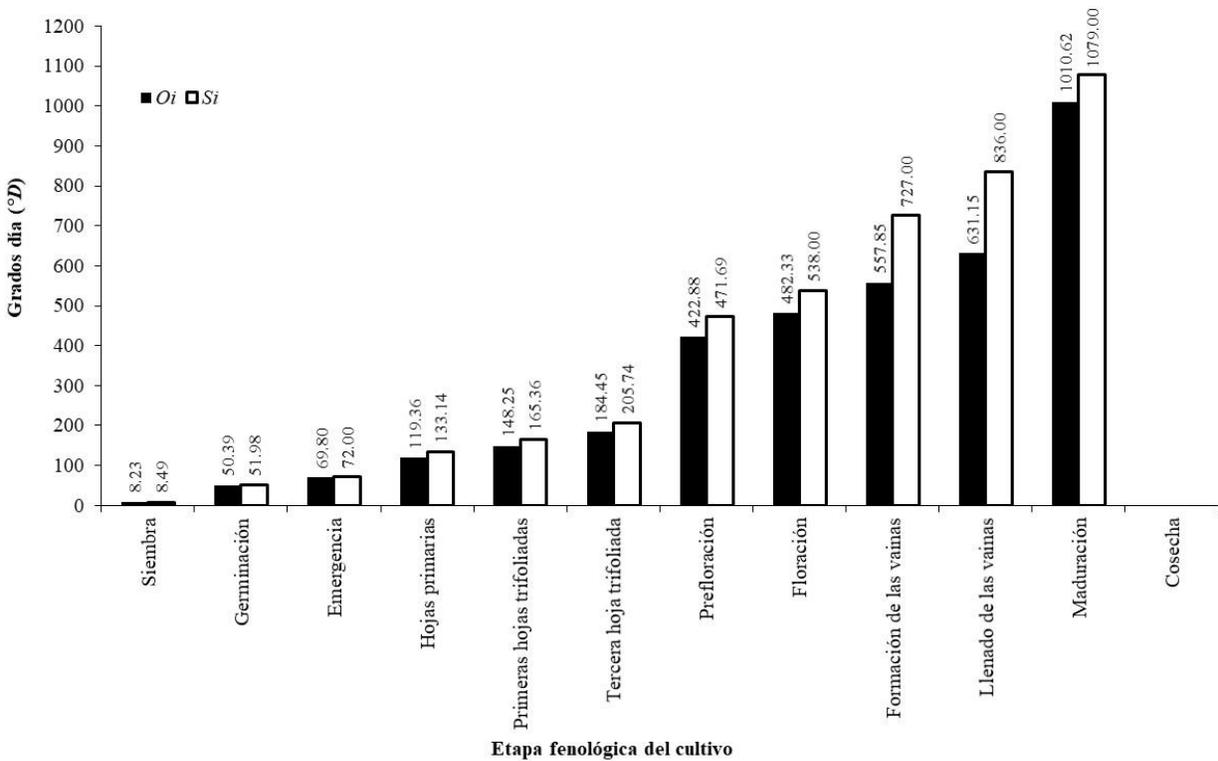


Figura 1.10. Comportamiento fenológico observado en campo (*Oi*) en comparación con la fenología simulada (*Si*) con AquaCrop.

Cabe mencionar que solamente se utilizó una de las variedades de frijol más utilizadas por los productores de la región de estudio, por lo cual 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. Lo anterior resulta de vital importancia para caracterizar a la mayor cantidad de variedades de frijol sembradas en México, contribuyendo en la generación de información para la simulación del crecimiento y rendimiento del cultivo con información obtenida en campo, puesto que los datos que incluye el modelo AquaCrop en su catálogo difieren a los generados en México de forma local y regional.

1.6 CONCLUSIONES

El modelo AquaCrop mostró una alta correlación por la alta cercanía entre los datos *Si* y *Oi*. Sin embargo, es un modelo para simular la productividad del agua de los cultivos, pero obtuvo un buen desempeño para las condiciones de temporal, reflejando que existe un impacto en el dosel vegetal

del cultivo por las condiciones de estrés hídrico y térmico que fueron ocasionados por las condiciones climáticas de cada sitio.

El desempeño estadístico que mostró el modelo para las condiciones predominantes del estado de Durango, permite que se implemente 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. Por lo tanto, el modelo AquaCrop es una herramienta que puede ser utilizada para evaluar escenarios con diferentes manejos agronómicos y, por ende, como una herramienta de planeación en la superficie programada para establecer frijol porque permite cuantificar el impacto de diferentes condiciones climáticas, edáficas y de manejo agronómico.

CAPÍTULO II. MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PAPA EN EL NORTE DE SINALOA CON AQUACROP

2.1 RESUMEN

El cultivo de papa demanda un cuidado específico a través de su manejo agronómico, especialmente porque presenta una alta sensibilidad a la deficiencia o exceso de humedad en el suelo. En México, se siembra el cultivo de papa en zonas áridas y semiáridas, lo cual genera la aplicación de insumos en gran medida por la incertidumbre que presentan dichas zonas ante la variabilidad climática, plagas y enfermedades. El uso de modelos de simulación es una opción como herramienta para afrontar escenarios con escasez de agua, pero también sirve como apoyo para el productor en la toma de mejores decisiones en los trabajos que se deben realizar durante el ciclo del cultivo. En la presente investigación se parametrizó el modelo AquaCrop para simular el rendimiento del cultivo de papa establecido con riego por gravedad y utilizando cuatro variedades: ‘Alpha’, ‘Atlantic’, ‘Mundial’ y ‘FL1867’ en el norte de Sinaloa, México, durante los ciclos agrícolas otoño-invierno (O-I) 2005 y 2006. Para calibrar y validar el modelo se compararon los datos observados y simulados sobre la cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa y rendimiento de tubérculo, utilizando datos de productores cooperantes por medio de sus parcelas comerciales que fueron establecidas en el Distrito de Riego 075 “Río Fuerte”, ubicado en el Valle del Fuerte. Los resultados mostraron que las predicciones del rendimiento con AquaCrop son buenas, obteniendo 2.64 t ha^{-1} para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*), un índice de Willmott (*d*) de 0.99, un coeficiente de determinación (R^2) de 0.83, una desviación estándar (σ) de 1.3 y un coeficiente de variación (*CV*) con 0.04. El modelo AquaCrop es una alternativa viable para modelar el rendimiento de papa con su previa calibración y validación, dando la oportunidad de conocer el rendimiento esperado y potencial del cultivo con una mayor certidumbre.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, riego por gravedad, tubérculo, variabilidad climática.

2.2 ABSTRACT

Potato crop demands specific care through its agronomic management, especially because it has a high sensitivity to deficiency or excess moisture in the soil. In Mexico, potato crop is sowed in arid and semi-arid areas, which generates the application of inputs largely due to the uncertainty presented by these areas due to climate variability, pests and diseases. The use of simulation models is an option as a tool to face scenarios with water scarcity, but also serves as support for the producer in making better decisions in the work that must be carried out during the crop cycle. In the present research, the AquaCrop model was parameterized to simulate the yield of the potato crop established with surface irrigation and using four varieties: 'Alpha', 'Atlantic', 'Mundial' and 'FL1867' in northern Sinaloa, Mexico, during the autumn-winter (A-W) growing seasons 2005 and 2006. To calibrate and validate the model, the observed and simulated data on canopy cover, biomass production and tuber yield were compared, using data from cooperating producers through their commercial plots that were established in the Irrigation District 075 "Río Fuerte", located in the Valle del Fuerte. The results showed that the performance predictions with AquaCrop are good, obtaining 2.64 t ha^{-1} for the square root of the root mean square error (*RMSE*), a Willmott index (*d*) of 0.99, a coefficient of determination (R^2) of 0.83, a standard deviation (σ) of 1.3 and a coefficient of variation (*CV*) with 0.04. The AquaCrop model is a viable alternative to model potato yield with its previous calibration and validation, giving the opportunity to know the expected yield and potential of the crop with greater certainty.

Keywords: *Solanum tuberosum*, surface irrigation, tuber, climate variability.

2.3 INTRODUCCIÓN

El principal productor de papa (*Solanum tuberosum*) a nivel mundial es China, pero los mayores rendimientos promedio se registran en Kuwait con 51.9 t ha^{-1} , Nueva Zelanda con 50.8 t ha^{-1} y Estado Unidos con 49.0 t ha^{-1} (FAOSTAT, 2023). Además, se considera que la papa se encuentra entre los cinco principales productos alimenticios con mayor importancia para la humanidad (Razzaghi *et al.*, 2017; FAO, 2021). En México, los principales productores de papa son los estados de Sonora y Sinaloa, los cuales producen la mitad del total de papa a nivel nacional, estas entidades se encuentran en el norte del país y cuentan con zonas áridas y semiáridas para la producción agrícola, lo cual demanda de mejores técnicas y metodologías para el suministro de los insumos que son requeridos en la producción del cultivo a pesar de contar con mayor valor agregado (Mejía y Castellanos, 2018). Debido a lo anterior, se considera que el manejo tradicional del cultivo de papa es menos funcional debido a la alta variabilidad climática de las zonas productoras del noroeste de México y como consecuencia se aplican cantidades excesivas de insumos que generan contaminación y una baja rentabilidad (Sifuentes *et al.*, 2013).

De acuerdo con las estadísticas oficiales del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022), durante el año 2021 se registró una producción total aproximada a los dos millones de t, con un rendimiento promedio de 31.8 t ha^{-1} a nivel nacional y un consumo per cápita anual de 16 kg, sin embargo, la demanda sobre el tubérculo genera la necesidad de importar un 20 % de forma anual (alrededor de 180 mil t). Por lo anterior, los modelos de simulación del crecimiento de los cultivos son una herramienta útil para evaluar el impacto del clima y el ambiente, el manejo agronómico, la genética y las estrategias de mejoramiento, así como el cambio climático y la variabilidad que presenta en el crecimiento y el rendimiento (Craufurd *et al.*, 2013). Sin embargo, la utilización de los modelos para la simulación del crecimiento y rendimiento de los cultivos en México es limitada debido a que no existe disponibilidad total de la información requerida para su empleo en dichos sistemas y algoritmos, de modo que no se realiza su calibración ni validación con datos experimentales. Sin embargo, se han reportado algunos trabajos realizados en México con el modelo AquaCrop para maíz bajo riego en la zona norte del estado de Sinaloa, México (Flores-Gallardo *et al.*, 2013) y para estudiar cultivos establecidos bajo temporal, entre ellos la papa bajo escenarios de cambio climático, pero de forma empírica mediante la comparación de los rendimientos reportados oficialmente en las estadísticas agrícolas (Arce-Romero *et al.*, 2020).

Para el cultivo de papa existen modelos de simulación biológica que determinan los días después de la siembra (DDS), grados día ($^{\circ}D$), fases fenológicas y rendimiento, tales como el DSSAT (Hoogenboom *et al.*, 2021; Jones *et al.*, 2003), CropSyst (Alva *et al.*, 2010), SPUDSIM (Fleisher *et al.*, 2010), AquaCrop (Raes *et al.*, 2009a; de la Casa *et al.*, 2013; Montoya *et al.*, 2016) y SIMPOTATO (Hodges *et al.*, 1992). No obstante, la compleja respuesta de los cultivos a las variaciones en el déficit hídrico encausa a la utilización de funciones empíricas para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico, aplicado durante una parte o en la totalidad del ciclo del cultivo (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). De acuerdo con de la Casa *et al.* (2014), se han utilizado modelos para estimar el rendimiento potencial de papa, pero basados solamente en la eficiencia en el uso de la radiación y la productividad del agua (PA). El modelo AquaCrop se ha implementado en la actualidad y desde su liberación en diversas regiones del mundo (Raes *et al.*, 2009a; Flores-Gallardo *et al.*, 2015; Raes *et al.*, 2022), puesto que funciona como una herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos, localidades y condiciones de manejo (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Además, este modelo determinístico utiliza un número reducido de parámetros en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes *et al.*, 2009b). A pesar de lo anterior, el método desarrollado por Doorenbos y Kassam (1979) sigue siendo uno de los más utilizados para estimar el rendimiento con parámetros empíricos, calibrados en experimentos de campo y con niveles diferentes de estrés hídrico de los cultivos.

El objetivo de esta investigación fue realizar la parametrización del modelo AquaCrop con datos del cultivo de papa obtenidos en parcelas de productores cooperantes en el norte de Sinaloa, México, para estudiar el desempeño del modelo en la simulación del crecimiento y rendimiento mediante su previa calibración y validación durante dos ciclos agrícolas otoño-invierno (O-I) 2005 y 2006 mediante la utilización de cuatro variedades comerciales de papa: ‘Alpha’, ‘Atlantic’, ‘Mundial’ y ‘FL1867’.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Localización del área de estudio

La investigación se desarrolló con los datos experimentales de Flores-Gallardo *et al.* (2012), los cuales fueron obtenidos durante dos ciclos agrícolas otoño-invierno (O-I) 2005 y 2006 en el

Distrito de Riego 075 “Río Fuerte” (DR-075), que se localiza en las coordenadas geográficas de 25° 48.89’ N, 109° 1.53’ O a una altitud promedio de 20 m, en los módulos de riego Santa Rosa y Taxtes (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Parcelas de productores cooperantes con las variedades de papa: ‘Alpha’, ‘Atlantic’, ‘Mundial’ y ‘FL1867’.

No.	Parcela	Módulo	Variedad	Superficie (ha)	Fecha de siembra
1	Las Torres	Santa Rosa	‘Atlantic’	77.85	19-Nov-05
2	La Pinera	Santa Rosa	‘Atlantic’	54.90	10-Nov-05
3	Las 30	Santa Rosa	‘Atlantic’	28.63	16-Dec-05
4	El Campo	Taxtes	‘Alpha’	20.00	21-Dec-05
5	Cave	Santa Rosa	‘Alpha’	10.00	03-Oct-05
6	Vargas	Santa Rosa	‘Atlantic’	48.00	08-Oct-05
7	Chispas	Taxtes	‘Alpha’	15.00	22-Dec-05
8	Guamuchilito	Taxtes	‘Alpha’	16.00	05-Dec-05
9	Km. 24	Santa Rosa	‘Mundial’	15.00	28-Nov-05
10	Ej. Plan de Ayala 1	Santa Rosa	‘Alpha’	9.00	10-Oct-05
11	Ej. Plan de Ayala 2	Santa Rosa	‘Alpha’	5.35	06-Oct-05
12	Ej. Plan de Ayala 3	Santa Rosa	‘Alpha’	9.50	07-Oct-05
13	Ej. 9 de Diciembre 1	Santa Rosa	‘Alpha’	9.80	05-Oct-05
14	Ej. 9 de Diciembre 2	Santa Rosa	‘Alpha’	9.80	11-Oct-05
15	Ej. Flores Magón 1	Santa Rosa	‘Alpha’	18.09	14-Oct-05
16	Ej. Flores Magón 2	Santa Rosa	‘Alpha’	18.09	17-Nov-05
17	Vargas	Santa Rosa	‘Atlantic’	48.00	13-Oct-06
18	Km. 24	Santa Rosa	‘FL1867’	15.00	12-Dec-06
19	Ej. 9 de Diciembre 2	Santa Rosa	‘Alpha’	9.80	06-Nov-06
20	Ej. Flores Magón 2	Santa Rosa	‘Alpha’	18.09	10-Nov-06

Se utilizaron 20 parcelas de productores cooperantes con sistema de riego por gravedad, las cuales constan de una superficie total de 455.90 ha, y la información meteorológica se obtuvo de la red de estaciones agrometeorológicas del DR-075 (Figura 2.1).

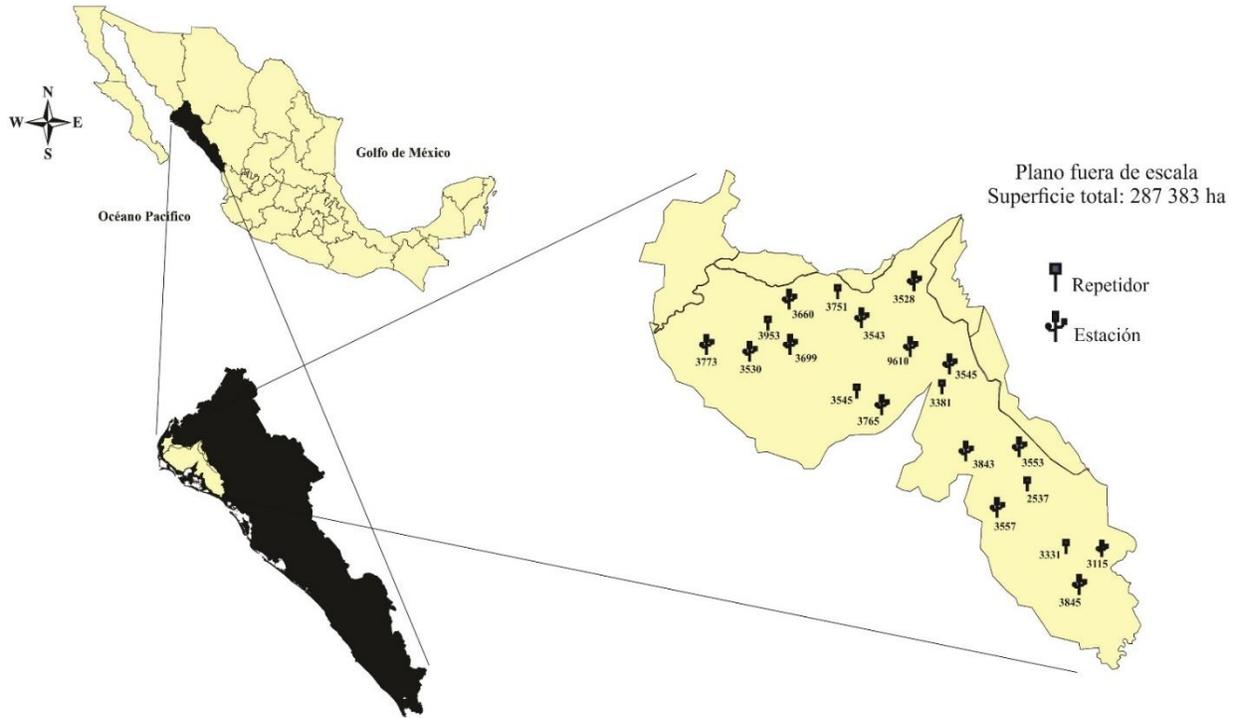


Figura 2.1. Distribución de la red de estaciones agrometeorológicas del DR-075 (adaptado de Flores-Magdaleno *et al.*, 2014).

Los suelos predominantes tienen una textura franco arcillosa, con valores típicos de 50 % arcilla (R), 30 % limo (L) y 20 % arena (A), bajos en materia orgánica (menos de 1 %), con una densidad aparente de 1.2 g cm^{-3} y una humedad aprovechable volumétrica de 15 % (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2011; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006). La temperatura media anual es de $24.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y la precipitación acumulada de 340 mm (concentrada de julio a octubre), la evapotranspiración de referencia (ET_o) tiene un valor medio anual de 4.2 mm d^{-1} con un intervalo de 2.3 a 6 mm d^{-1} (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).

2.4.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop

Algunos de los parámetros conservativos que contiene el modelo AquaCrop en su catálogo se describen en el Cuadro 2.2, puesto que fueron adaptados de acuerdo con las características de la zona de estudio y las variedades de papa sembradas, siendo que los datos de los parámetros conservativos corresponden a un cultivo de papa bajo temporal y en el presente estudio se estableció el cultivo con sistema de riego por gravedad, generando una adecuación de cierto parámetros para la correcta modelación del crecimiento y rendimiento.

Cuadro 2.2. Parámetros conservativos de referencia con un experimento de papa realizado en Lima, Perú.

Descripción	Conservativ	Adaptad
	o	o
Temperatura base (°C)	2	2
Temperatura máxima (°C)	26	29
Densidad de población: número de plantas ha ⁻¹	40000	65000
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)	0.26994	0.33210
Máximo dosel vegetal (CC _x)	0.92	0.92
Productividad del agua (WP), normalizado para ETo y CO ₂ (g m ⁻²)	18.0	32.0
Índice de cosecha (Hi) como referencia	75	75
°D totales desde emergencia a maduración	1276	2105

Para el cálculo de los °D a nivel diario, se considera la $T_{mín}$ y $T_{máx}$ como las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dichos umbrales establecen los límites para un adecuado desarrollo de la planta.

Por lo tanto, las temperaturas para el desarrollo de la papa que asume el modelo AquaCrop y estimar los °D, son de 2 °C y 26 °C, para $T_{mín}$ y $T_{máx}$, respectivamente, pero de acuerdo con estudios realizados en la zona por Ojeda-Bustamante *et al.* (2004) y Flores-Gallardo *et al.* (2012), se ajustó la $T_{máx}$ con un valor de 29 °C.

2.4.3 Análisis estadístico de los datos y tratamientos

Una vez realizada la parametrización, se procedió a la calibración y validación del modelo AquaCrop con los datos obtenidos en campo, aplicando el análisis estadístico de los datos de rendimiento y duración del ciclo del cultivo observados en campo y simulados (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Para lo anterior, se utilizaron los siguientes análisis estadísticos: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y el índice de Willmott (d) de acuerdo con (Willmott, 1982), calculados con las siguientes ecuaciones:

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

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i| + |O_i|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (2)$$

En 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, es considerado como un indicador de la incertidumbre porque toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un buen desempeño en la simulación.

El valor d (ecuación 2) varía desde cero hasta uno y, por lo cual, ambos análisis fueron aplicados de forma secuencial a los datos observados y simulados.

Por último, con la finalidad de comparar estadísticamente los valores S_i contra los valores O_i , se utilizaron los siguientes análisis estadísticos: coeficiente de variación (CV) y desviación estándar (σ) calculados con las siguientes ecuaciones:

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad (3)$$

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

Donde σ es la desviación estándar, \bar{x} es el valor medio, y x_i es cada observación registrada.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 Rendimiento observado y simulado

Los datos de rendimiento de tubérculo simulado en comparación con los datos observados en campo (Figura 2.2), presentaron una σ de 1.30 en promedio, no obstante, su CV resultó de 0.04, su R^2 fue de 0.83 con una $RMSE$ 2.64 t ha⁻¹ y un Índice de Willmott (d) con 0.99, estos últimos datos se asemejan a trabajos realizados en otras regiones agrícolas ubicadas en Argentina, España, Etiopía y Dinamarca (de la Casa *et al.*, 2013; Montoya *et al.*, 2016; Wale *et al.*, 2022; Razzaghi *et al.*, 2017).

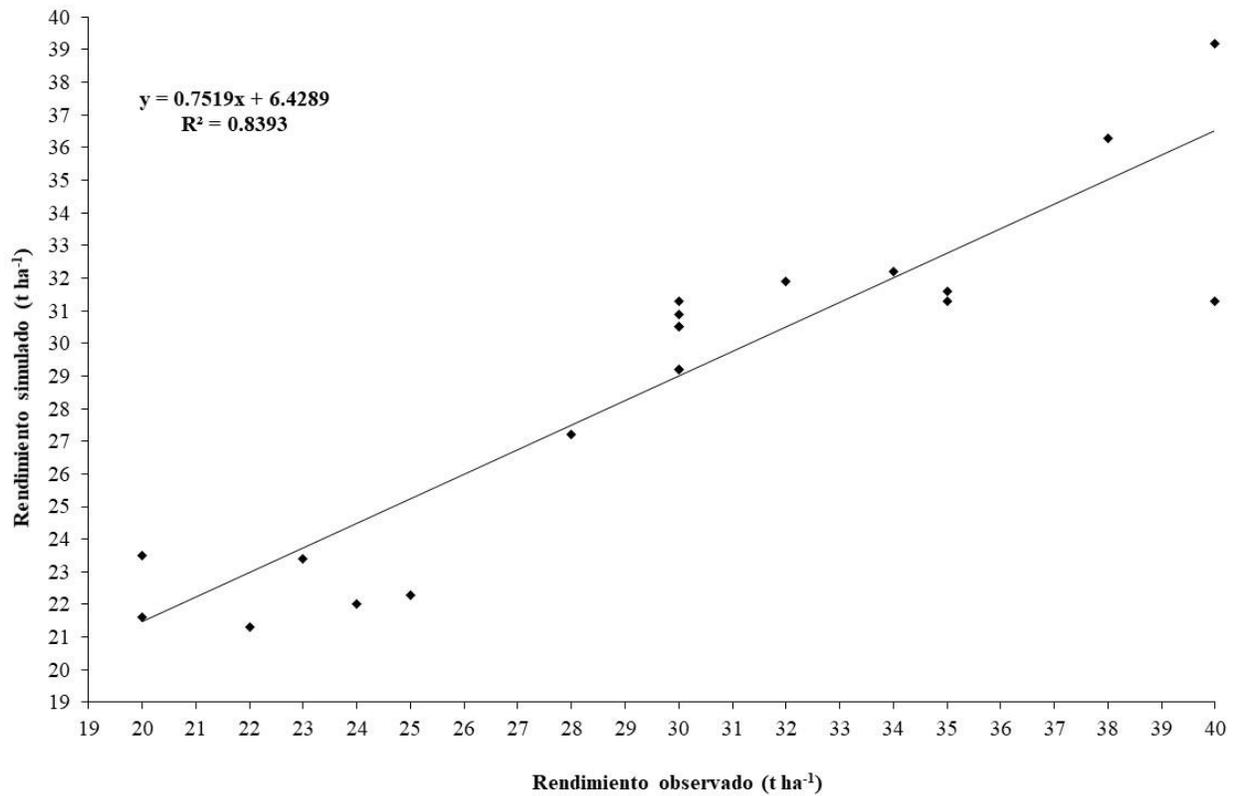


Figura 2.2. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de rendimiento de tubérculo O_i y S_i con el modelo AquaCrop.

En lo referente a la biomasa (B) se tuvo un comportamiento similar al rendimiento de tubérculo, con una σ de 1.73 en promedio, un CV de 0.04 y una R^2 de 0.83 para todos los datos O_i y S_i .

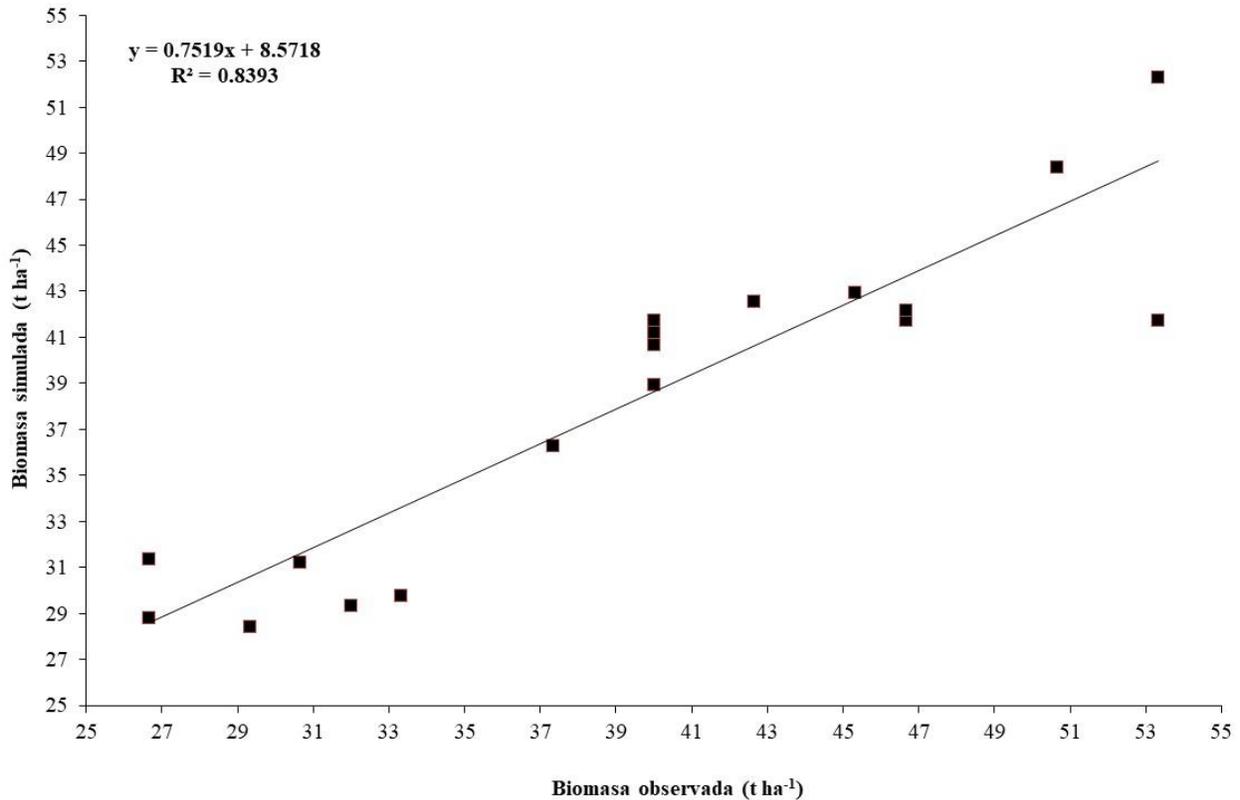


Figura 2.3. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de biomasa (B) O_i y S_i con el modelo AquaCrop.

2.5.2 Fenología observada en campo vs. simulación

La fenología del cultivo de papa resulta más corta en cuanto a etapas de desarrollo se refiere, sin embargo, es complicado determinar el avance del cultivo en su etapa reproductiva porque los frutos de interés, en este caso están enterrados y por ello se deben realizar algunos muestreos destructivos con la finalidad de apreciar lo mejor posible su desarrollo. Cabe mencionar que la siembra y cosecha no se consideran etapas fenológicas, pero en algunos trabajos se hacen cálculos para dichas fases o etapas con el propósito de tener una mejor referencia con respecto a los DDS.

A continuación, se presentan comparaciones (Cuadro 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6) entre la fenología medida con $^{\circ}D$ en campo (O_i) con respecto a lo simulado (S_i) por cada variedad sembrada. Los valores son similares a los reportados por Flores-Magdaleno *et al.* (2014) aunque el modelo AquaCrop tiende a sobreestimar ligeramente los valores de $^{\circ}D$ para cada variedad.

Cuadro 2.3. Fenología *Oi* y *Si* en papa correspondiente a la variedad ‘Alpha’.

No.	Clave	Etapa	Grados día (<i>°D</i>)	
			<i>Oi</i>	<i>Si</i>
1	N/A	Siembra	0	0
2	V1	Crecimiento de yemas y raíces	284.95	355.60
3	V2	Emergencia	440.25	528.51
4	V3	Desarrollo vegetativo e inicio de formación de tubérculos	604.60	705.09
5	R1	Desarrollo de tubérculos (inicio de tuberización)	712.00	845.30
6	R2	Madurez fisiológica de la planta y tubérculos	991.50	1107.29
7	R3	Tuberización de tubérculos	1858.65	1924.98
8	N/A	Cosecha	0	0

Cuadro 2.4. Fenología *Oi* y *Si* en papa correspondiente a la variedad ‘Atlantic’.

No.	Clave	Etapa	Grados día (<i>°D</i>)	
			<i>Oi</i>	<i>Si</i>
1	N/A	Siembra	0	0
2	V1	Crecimiento de yemas y raíces	313.80	355.60
3	V2	Emergencia	458.45	528.51
4	V3	Desarrollo vegetativo e inicio de formación de tubérculos	648.35	705.09
5	R1	Desarrollo de tubérculos (inicio de tuberización)	738.10	845.30
6	R2	Madurez fisiológica de la planta y tubérculos	1017.35	1107.29
7	R3	Tuberización de tubérculos	1785.75	1924.98
8	N/A	Cosecha	0	0

Cuadro 2.5. Fenología *Oi* y *Si* en papa correspondiente a la variedad ‘Mundial’.

No.	Clave	Etapa	Grados día (*D)	
			<i>Oi</i>	<i>Si</i>
1	N/A	Siembra	0	0
2	V1	Crecimiento de yemas y raíces	300.05	355.60
3	V2	Emergencia	469.65	528.51
4	V3	Desarrollo vegetativo e inicio de formación de tubérculos	615.60	705.09
5	R1	Desarrollo de tubérculos (inicio de tuberización)	734.70	845.30
6	R2	Madurez fisiológica de la planta y tubérculos	1030.25	1107.29
7	R3	Tuberización de tubérculos	1855.45	1924.98
8	N/A	Cosecha	0	0

Cuadro 2.6. Fenología *Oi* y *Si* en papa correspondiente a la variedad ‘FL1867’.

No.	Clave	Etapa	Grados día (*D)	
			<i>Oi</i>	<i>Si</i>
1	N/A	Siembra	0	0
2	V1	Crecimiento de yemas y raíces	279.10	355.60
3	V2	Emergencia	410.40	528.51
4	V3	Desarrollo vegetativo e inicio de formación de tubérculos	634.20	705.09
5	R1	Desarrollo de tubérculos (inicio de tuberización)	705.50	845.30
6	R2	Madurez fisiológica de la planta y tubérculos	1002.80	1107.29
7	R3	Tuberización de tubérculos	1784.60	1924.98
8	N/A	Cosecha	0	0

En los resultados del dosel vegetal se asemejan a los reportados por Montoya *et al.* (2016), aunque la duración de su ciclo del cultivo es mucho más extensa con respecto al comportamiento de las variedades sembradas en Sinaloa.

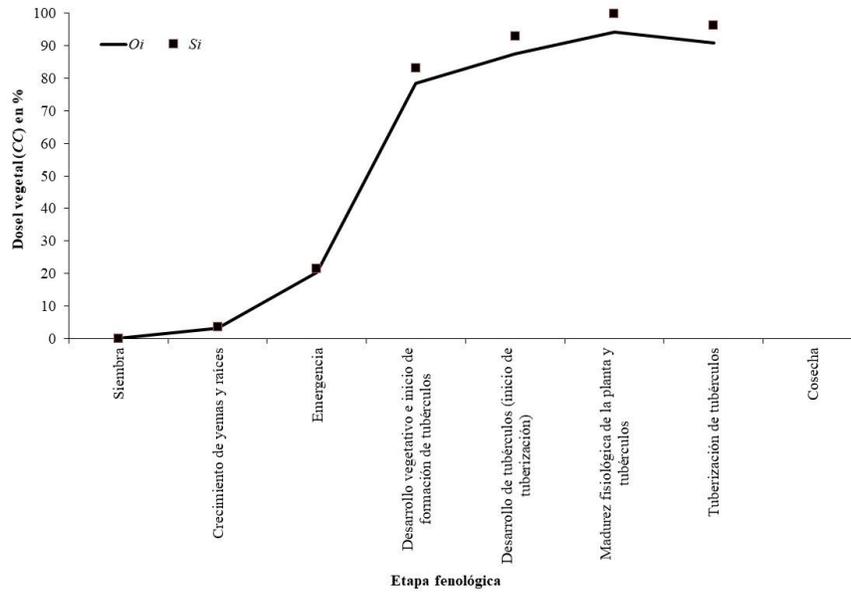


Figura 2.4. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (*Oi*) en comparación con la fenología simulada (*Si*) con AquaCrop en la variedad ‘Alpha’.

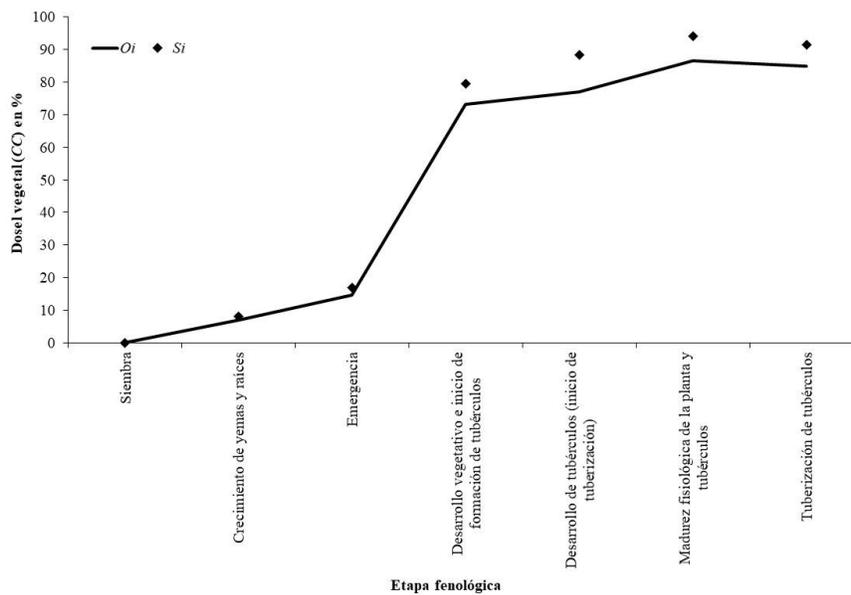


Figura 2.5. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (*Oi*) en comparación con la fenología simulada (*Si*) con AquaCrop en la variedad ‘Atlantic’.

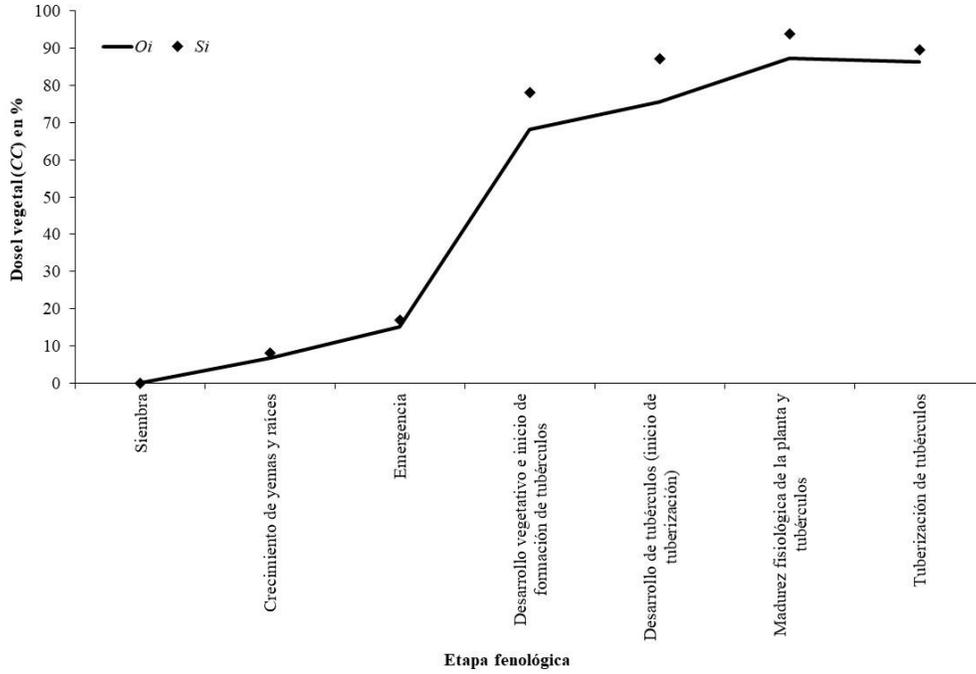


Figura 2.6. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (*Oi*) en comparación con la fenología simulada (*Si*) con AquaCrop en la variedad ‘Mundial’.

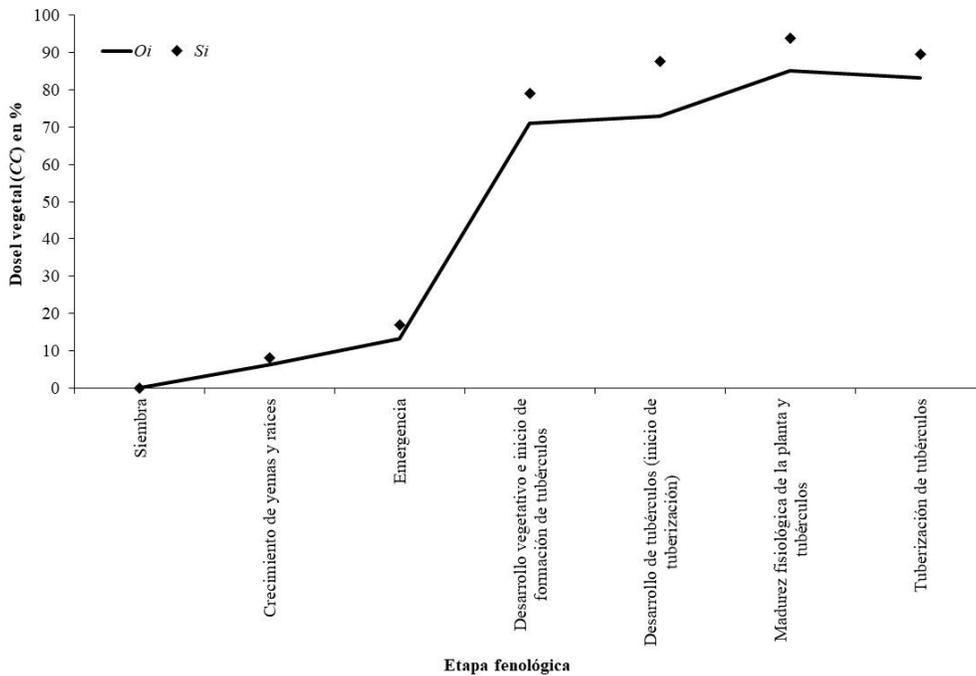


Figura 2.7. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (*Oi*) en comparación con la fenología simulada (*Si*) con AquaCrop en la variedad ‘FL1867’.

De acuerdo con Sifuentes *et al.* (2015), se cultivan otras variedades ('César', 'Vivaldi', 'Fianna', 'Gigant') en la región y por lo tanto, se considera que deben ser caracterizadas de igual manera mediante la obtención de datos observados en campo para la calibración y validación de sus parámetros con el propósito de simular el rendimiento y crecimiento del cultivo con el modelo AquaCrop, puesto que registran diferentes cantidades acumuladas de °D, lo cual repercute en la duración del ciclo del cultivo y en su desarrollo en general.

2.6 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 tubérculo de papa bajo la modalidad de riego por gravedad, dicho sistema es el predominante en el norte de Sinaloa, aunque cabe mencionar que también se deben hacer estudios con sistema de riego por aspersión y goteo.

Los rendimientos simulados fueron fiables porque los análisis estadísticos muestran un gran desempeño del modelo para las condiciones predominantes del norte de Sinaloa, pues resultó una sobreestimación del rendimiento de 2.64 t ha^{-1} (*RMSE*) y un 0.99 (*d*). Por lo tanto, se tiene la confianza para ser replicado en otras regiones paperas de México con el propósito de ofrecer un panorama claro a los productores respecto con la toma de decisiones, por ejemplo, en la aplicación de insumos y de riego.

Con la información generada en la presente investigación, se puede realizar simulaciones sobre diferentes fechas de siembra y analizar el comportamiento del cultivo en épocas tardías o con diferentes escenarios de disponibilidad de agua.

CAPÍTULO III. MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE FORRAJE Y GRANO DE MAÍZ CULTIVADO BAJO RIEGO CON EL MODELO AQUACROP

3.1 RESUMEN

La constante demanda de forraje y grano de maíz (*Zea mays*) ocasiona que la agricultura de riego sea eficiente en mayor medida para satisfacer las demandas de una población en constante crecimiento. En México se tiene una gran tradición sobre el consumo de maíz en la alimentación poblacional, pero no se cuenta con una autosuficiencia sobre dicho grano, generando la necesidad de importar grandes cantidades del producto para satisfacer la demanda nacional. Con las nuevas tecnologías y el enfoque hacia una agricultura de precisión, se requieren de herramientas que permitan ofrecer alternativas a los productores sobre el manejo adecuado del cultivo para asegurar rendimientos con calidad y cantidad, entre dichas herramientas se encuentran los modelos de simulación del crecimiento y rendimiento de los cultivos, los cuales permiten predecir cosechas ante diferentes escenarios de manejo agronómico y disponibilidad de agua, para ello se requiere la realización de trabajos experimentales que sean transferidos a los productores con éxito a través de la adopción de tecnología. En la presente investigación se parametrizó el modelo AquaCrop para modelar el rendimiento del cultivo de maíz con dos híbridos (XR20A y XR21) comerciales que fueron sembrados bajo riego por gravedad en el Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP, ubicado en el Distrito de Riego 052 “Durango”, durante los ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) 2015, 2016 y 2017. Por lo tanto, se compararon los datos observados y simulados sobre algunas variables del cultivo para calibrar y validar el modelo AquaCrop, entre dichos datos se consideró la cobertura del dosel vegetal, rendimiento de grano y manejo agronómico en general. Los resultados indicaron que las predicciones del rendimiento de grano con el modelo son viables debido a la obtención de un valor de 0.47 t ha^{-1} para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) y un índice de Willmott (*d*) de 0.99. El modelo AquaCrop es una alternativa viable para conocer el rendimiento esperado y potencial del cultivo de maíz, coadyuvando en la toma de mejores decisiones de los agricultores.

Palabras clave: Calibración, parametrización, simulación, validación, *Zea mays*.

3.2 ABSTRACT

The constant demand for forage and corn grain (*Zea mays*) makes the irrigated agriculture more efficient to meet the demands of an ever-growing population. In Mexico, there is a great tradition about the consumption of corn in the population diet, but there is no self-sufficiency on this grain, generating the need to import large quantities of the product to satisfy national demand. With new technologies and focus on precision agriculture, tools are required to offer alternatives to producers on the proper management of the crop to ensure yields with quality and quantity, among these tools are the simulation models for crop growth and yield, which allow predicting harvests under different scenarios of agronomic management and water availability, for this it is required to carry out experimental works that are successfully transferred to producers through the adoption of technology. In the present research, the AquaCrop model was parameterized to model the yield of the corn crop with two commercial hybrids (XR20A and XR21) that were sowed under surface irrigation in the Valle del Guadiana Experimental Station of INIFAP, located in the Irrigation District 052 "Durango", during the spring-summer (S-S) growing seasons 2015, 2016 and 2017. Therefore, the observed and simulated data on some crop variables were compared to calibrate and validate the AquaCrop model, among these data the canopy cover, grain yield and agronomic management in general were considered. The results indicated that grain yield predictions with the model are viable due to obtaining a value of 0.47 t ha⁻¹ for the root mean square error (*RMSE*) and the Willmott index (*d*) with 0.99. The AquaCrop model is a viable alternative to know the expected and potential yield of the corn crop, contributing to the making of better decisions of farmers.

Keywords: Calibration, parameterization, simulation, validation, *Zea mays*.

3.3 INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel nacional e internacional, lo cual es resultado de su importancia alimenticia, social y económica (Flores-Gallardo *et al.*, 2017). Esta especie se ha convertido en uno de los principales productos de carácter alimenticio e industrial en los mercados mundiales, debido a sus cualidades alimenticias para la producción de proteína animal, consumo humano y uso industrial (FIRA, 2016). La seguridad alimentaria es un reto mundial y en México es imperante para producir la suficiente cantidad de alimentos, con calidad alta y precios accesibles. Por lo anterior, la agricultura de riego es importante para responder al aumento de la demanda de alimentos de la población que día con día aumenta; aunque la superficie de cultivo ha permanecido casi estable en las últimas cuatro décadas (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2012).

El uso del maíz se puede clasificar en tres modalidades: 1) como alimento humano, 2) como forraje (para formular raciones alimenticias para el ganado) y, 3) como insumo para la fabricación de alimentos balanceados, aceites comestibles y almidones (SIAP, 2004). A pesar de su importancia alimenticia, se ha incrementado el uso del maíz en la elaboración de combustibles de baja emisión de contaminantes (biocombustibles), como el etanol. Por lo anterior, la productividad del maíz es insuficiente en México porque los rendimientos de forraje y grano son variables, de acuerdo a la región y zona agroecológica de cultivo. La variabilidad de la productividad del maíz resulta de las diferencias en el manejo agronómico y su interacción con las condiciones edáficas y climáticas donde se produce esta especie. En México, aunque el maíz es cultivado en la mayoría de las zonas de riego y temporal, se importan alrededor de doce millones de toneladas (t) anualmente, lo que representa la tercera parte de sus necesidades de grano básico (SIAP, 2017).

El maíz es una de las especies con mayor cantidad de estudios en el ámbito agronómico, puesto que se han realizado diferentes investigaciones sobre su respuesta al agua bajo diferentes condiciones de manejo y clima, pero también con un sentido de evaluación económico (Gadedjisso-Tossou *et al.*, 2019). Con el modelo AquaCrop no es la excepción, puesto desde la liberación del modelo, uno de los cultivos iniciales que se incluyeron en el catálogo fue precisamente el maíz (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009). A partir de ello, se realizaron estudios en diferentes regiones del mundo con dicha especie (Abedinpour *et al.*, 2012;

Flores-Gallardo *et al.*, 2013; Ahmadi *et al.*, 2015) y también bajo diferentes escenarios de cambio climático (Abedinpour *et al.*, 2014; Arce-Romero *et al.*, 2020).

El objetivo de esta investigación fue realizar la parametrización del modelo AquaCrop con datos experimentales para modelar el rendimiento del cultivo de maíz, mediante su calibración y validación de los parámetros requeridos para utilizar el modelo con dos híbridos comerciales que fueron sembrados bajo riego por gravedad en el Campo Experimental Valle del Guadiana del INIFAP, ubicado en el Distrito de Riego 052 “Durango”, durante los ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) 2015, 2016 y 2017.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Localización, características climáticas y edáficas del área de estudio

Los trabajos se realizaron durante tres ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) 2015, 2016 y 2017, estableciendo parcelas semi-comerciales de maíz en el Campo Experimental Valle del Guadiana (INIFAP-Durango) con unas coordenadas geográficas LN 23° 59’ 18.6”, LW -104° 37’ 32.4” y una altitud de 1878 m, para ello, se utilizaron dos híbridos comerciales de maíz utilizados en la región (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Características de los materiales de maíz utilizados en Durango durante los ciclos agrícolas P-V 2015, 2016 y 2017.

Características	XR20A	XR21
Ciclo (tipo duración)	Intermedio - Precoz	Intermedio - Precoz
Días a floración (d)	65 - 70	66 - 68
Días a madurez (d)	132 - 135	138 - 140
Días a cosecha (d)	160 - 170	165 - 175
Altura de la mazorca (m)	1.14	1.15 m
Altura de la planta (m)	2.45 - 2.75	2.8 - 2.9

El clima predominante en el sitio de estudio es el templado semiárido, con régimen de lluvias en verano, mostrando variación fuerte de temperatura [BS1 Kw(w)(e)] y la media anual para esa variable es 17.4 °C (García, 1987). La lluvia acumulada durante el año alcanza un promedio de 476 mm, con valores altos entre junio y septiembre (Medina *et al.* 2005). La evapotranspiración

de referencia (ETo) media anual es de 4.9 mm d⁻¹ con un intervalo de 0.3 a 8.9 mm d⁻¹ (INIFAP, 2017).

Las características edáficas presentan una clase textural franco arenosa, con una distribución diferente de partículas del suelo para arena (A), limo (L) y arcilla (R), así como de una densidad aparente (ρ_a) y contenido de materia orgánica (MO). Los datos precisos de las principales propiedades físicas y químicas se describen en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Propiedades físicas y químicas del suelo.

Propiedad	Valor
Arena (%)	62
Limo (%)	28
Arcilla (%)	10
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.295
Materia orgánica (%)	0.60
pH	8.15

3.4.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop

Una vez obtenidos los datos de las parcelas de validación, se utilizaron los parámetros conservativos del modelo AquaCrop (Cuadro 3.3) para fines de simulación del rendimiento del cultivo de maíz, dichos parámetros fueron reportados por primera vez para tres experimentos de maíz, los cuales se realizaron en España y Estados Unidos (Hsiao *et al.*, 2009). Sin embargo, se utilizó como referencia los reportados por Flores-Gallardo *et al.* (2013) para adaptarlos y realizar la adecuada validación del modelo para las condiciones climáticas de Durango.

Cuadro 3.3. Parámetros conservativos del modelo AquaCrop basados en resultados de otras regiones agrícolas (Hsiao *et al.*, 2009; Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

Descripción	Valor	Unidad o medida
Temperatura base	8	°C
Temperatura máxima	30	°C
Dosel vegetal al 90% emergido (CC_o)	6.5	cm ²
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)	1.3 %	Incremento relativo del CC por grado día desarrollo (°D)
Máximo dosel vegetal (CC_x)	-	En función de la densidad de plantas
Coefficiente del cultivo para transpiración con un dosel vegetal = 100%	1.03	Transpiración completa del dosel relativo a la ET_o
Coefficiente de declinación del cultivo antes de CC_x	0.3 %	Declinación por día de las hojas envejecidas
Coefficiente de declinación (CGC) hasta senescencia	1.06 %	Decremento del CC relativo a CC_x por °D
Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000	33.7	g (biomasa) m ⁻² , en función del CO ₂ atmosférico
Umbral de crecimiento de hoja p-alto	0.14	Como fracción del agua total disponible (TAW), sobre este crecimiento de hoja es inhibido
Umbral de crecimiento de hoja p-bajo	0.72	El crecimiento de la hoja se detiene completamente a este p
Coefficiente de estrés de crecimiento de la hoja para la formación de curva	2.9	Curva moderadamente convexa
Umbral de conductancia estomatal p-alto	0.69	Sobre esto, los estomas empiezan a cerrarse
Coefficiente de estrés de los estomas para la formación de la curva	6.0	Curva altamente convexa
Coefficiente de estrés de senescencia p-alto	0.69	Sobre esto, la senescencia del dosel inicia más rápido
Coefficiente de estrés de senescencia para la formación de la curva	2.7	Curva moderadamente convexa
Índice de cosecha (Hi) como referencia	48 %	Común para buena condiciones
°D desde el 90% de emergencia al inicio de la antesis	800	Puede ser menor para cultivos de ciclo corto
Duración de la antesis en °D	190	-
Coefficiente de inhibición del crecimiento de las hojas con respecto al Hi	7.0	Hi aumentado por inhibición del crecimiento de las hojas en la antesis
Coefficiente de inhibición de los estomas con respecto al Hi	3.0	Hi reducido por inhibición de los estomas en la antesis
°D totales desde emergencia a maduración	1510-1840	Menos para cultivos de ciclo corto

3.4.3 Análisis estadístico

Una vez realizada la parametrización, se procedió a la calibración y validación del modelo AquaCrop con los datos obtenidos en campo, aplicando el análisis estadístico de los datos de rendimiento y duración del ciclo del cultivo observados en campo y simulados (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Para lo anterior, se utilizaron los siguientes análisis estadísticos: raíz cuadrada del cuadrado medio del error (*RMSE*) y el índice de Willmott (*d*) de acuerdo con (Willmott, 1982), calculados con las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = [n^{-1} \sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si| + |Oi|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (2)$$

En donde *n* es el número de observaciones realizadas, *Si* y *Oi* son los valores simulados y observados, respectivamente. Debido a que *RMSE* representa una medida global entre los valores observados y simulados, es considerado como un indicador de la incertidumbre porque toma las mismas unidades de la variable simulada y, por consiguiente, el valor más cercano a cero indica un buen desempeño en la simulación.

El valor *d* (ecuación 2) varía desde cero hasta uno y, por lo cual, ambos análisis fueron aplicados de forma secuencial a los datos observados y simulados.

Por último, con la finalidad de comparar estadísticamente los valores *Si* contra los valores *Oi*, se utilizaron los siguientes análisis estadísticos: coeficiente de variación (*CV*) y desviación estándar (σ) calculados con las siguientes ecuaciones:

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{X}|} \quad (3)$$

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

Donde σ es la desviación estándar, \bar{x} es el valor medio, y x_i es cada observación registrada.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la calibración del modelo AquaCrop, se consideraron los datos de las parcelas durante el primer ciclo agrícola P-V 2015 y posteriormente, se procedió a realizar la validación con el resto de ciclos agrícolas P-V 2016 y 2017. De lo anterior se obtuvo un resultado en el rendimiento de grano de 0.47 t ha^{-1} del *RSME* y un índice de Willmott (d) con valor de 0.99 para la misma variable. Sin embargo, también se realizaron otros análisis estadísticos en donde se obtuvo una R^2 de 0.95 entre los datos de rendimiento de grano observado (O_i) y simulado (S_i) con el modelo AquaCrop (Figura 3.1).

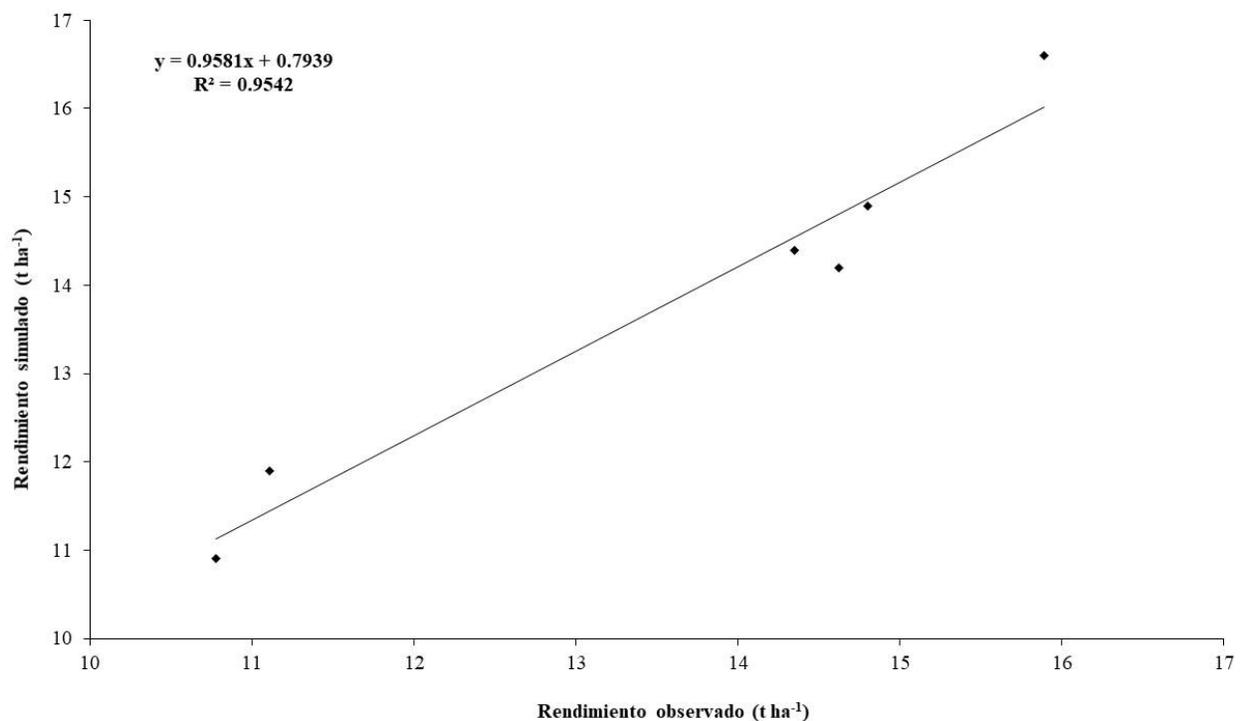


Figura 3.1. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de rendimiento de grano O_i y S_i con el modelo AquaCrop.

En estudios realizados en otras regiones para el mismo cultivo, se obtuvieron valores estadísticos similares por Flores-Gallardo *et al.* (2013), He *et al.* (2021). Sin embargo, con la utilización de otros modelos en maíz, como el CROPWAT y EPHICphase, se obtuvieron valores bastante diferentes con 5.25 t ha^{-1} para el *RSME*, lo cual convierte a los resultados menos confiables para realizar simulaciones en condiciones de alta variabilidad climática (Cavero *et al.*, 2000).

Para el caso del forraje producido por el cultivo de maíz, se consideraron los valores referentes a la Biomasa (B) que estima el modelo AquaCrop, en donde se obtuvieron resultados en campo (O_i) entre 14.6 a 25.6 t ha⁻¹, mientras que los datos simulados (S_i) por el modelo AquaCrop oscilaron entre 13.5 a 22.8 t ha⁻¹, resultados similares a los reportados por Greaves y Wang (2016) con rangos en dichos valores de 15.8 a 21.9 t ha⁻¹. No obstante, se obtuvo una R^2 de 0.65 entre los datos de $B O_i$ y $B S_i$ con el modelo AquaCrop (Figura 3.2).

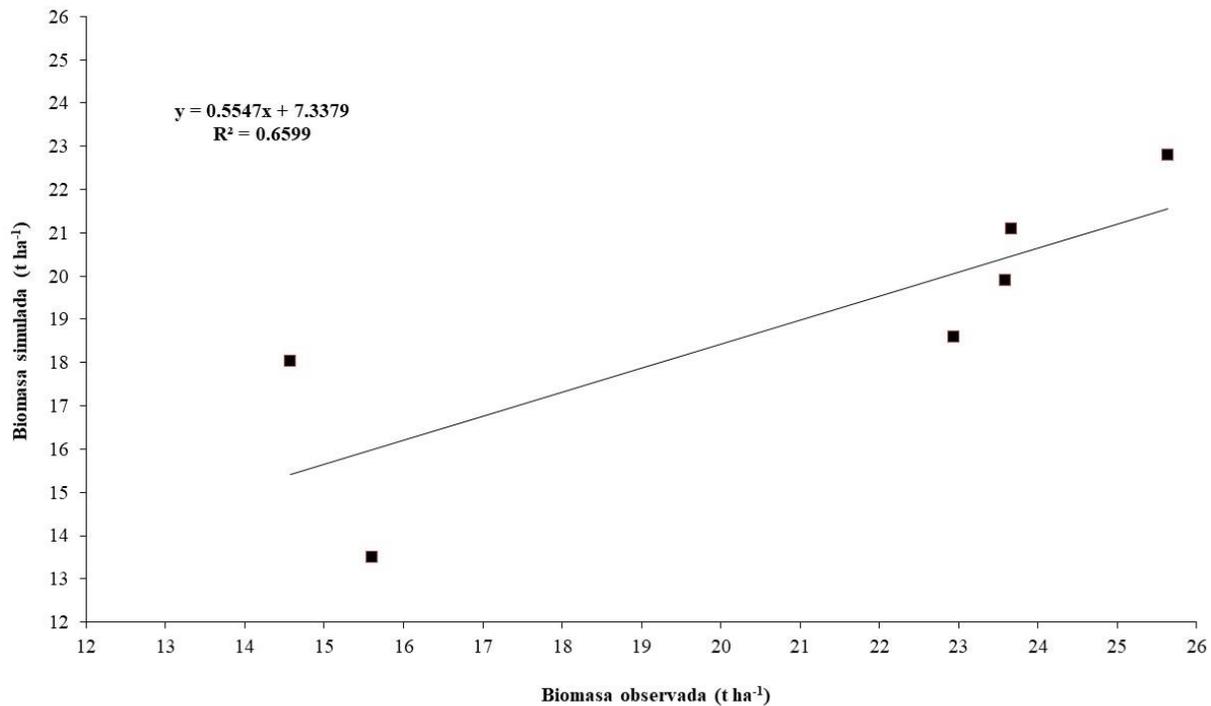


Figura 3.2. Coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de $B O_i$ y $B S_i$ con el modelo AquaCrop.

Los datos de fenología expresados en grados día ($^{\circ}D$) simulados (S_i) por el modelo AquaCrop, tuvieron una ligera sobreestimación de los datos comparados con lo estimado en campo (O_i) y en la Figura 3.3 se muestra un promedio por cada ciclo agrícola P-V estudiado.

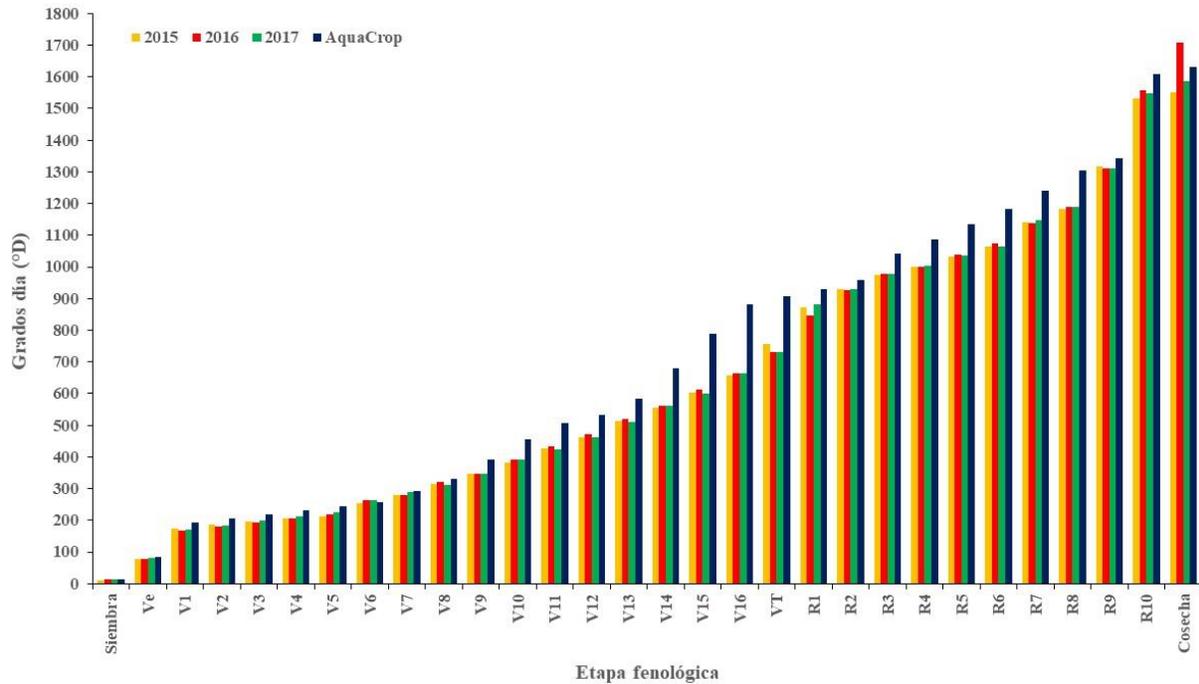


Figura 3.3. Comportamiento de la fenología del maíz expresada en $^{\circ}D$, observada en campo (O_i) y simulada (S_i) con el modelo AquaCrop.

Los dos híbridos de maíz utilizados en el estudio mostraron una acumulación similar de grados día ($^{\circ}D$), sin embargo, los datos obtenidos con el modelo AquaCrop presentaron un ligero incremento en los valores debido a las diferencias de cálculo que prevalecen por cada método de estimación y lo cual ocurrió de forma similar para el dosel vegetal del cultivo, presentando una sobreestimación de los datos estimados en campo (O_i) con respecto a los datos simulados (S_i) por cada ciclo agrícola P-V estudiado (Figura 3.4).

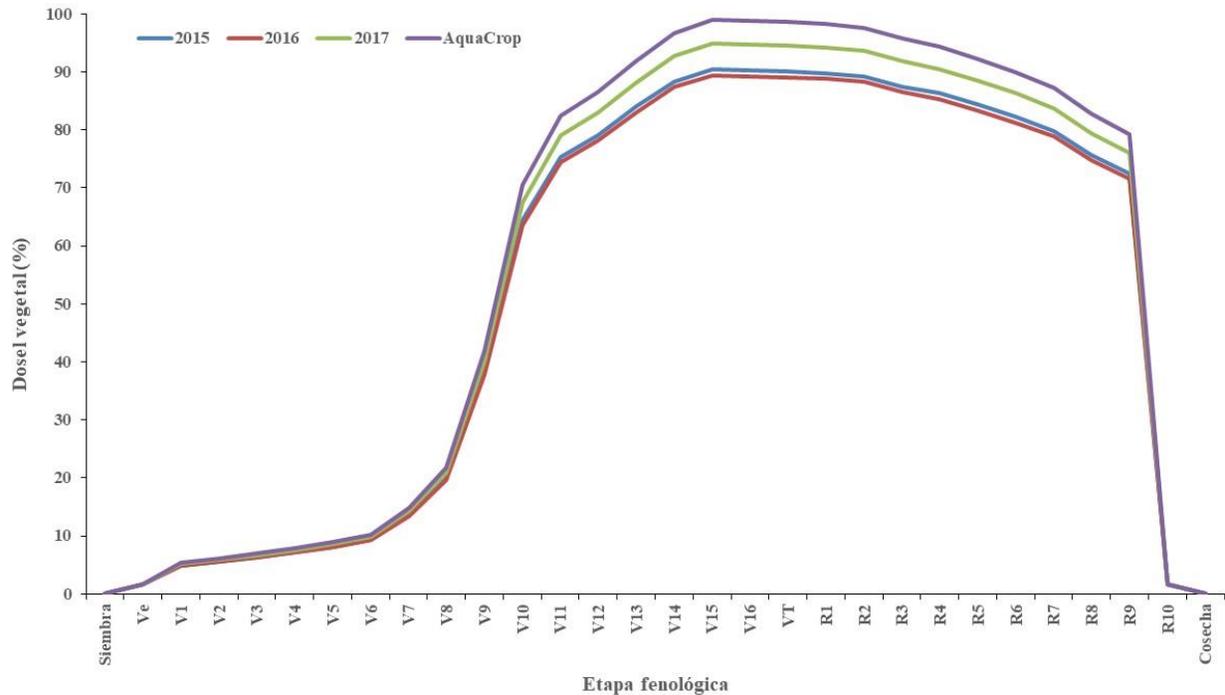


Figura 3.4. Comportamiento del dosel vegetal observado en campo (*Oi*) y simulado (*Si*) con AquaCrop expresado en porcentaje en comparación con la fenología del maíz.

También cabe mencionar que los datos obtenidos para la modalidad de producción bajo riego son mayores y los que se puedan obtener bajo la modalidad de producción de temporal son menores, por lo que su diferencia es lógica al presentar restricciones y no contar con un control del suministro de agua (Greaves y Wang, 2017).

3.6 CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos muestran un gran desempeño del modelo AquaCrop para las condiciones predominantes de Durango, debido a que tiene una sobreestimación del rendimiento de 0.47 t ha^{-1} (*RMSE*) y un 0.99 (*d*). Por lo tanto, puede ser replicado en otras regiones maiceras del estado para ofrecer alternativas de manejo a los productores y apoyar en la toma de decisiones en su manejo agronómico.

El modelo AquaCrop mostró ser una excelente herramienta por sus resultados estadísticos, lo cual genera confianza para realizar simulaciones a nivel parcelario sobre el rendimiento del maíz bajo

diferentes condiciones climáticas, de manejo agronómico y disponibilidad hídrica, lo cual se considera como posibles escenarios en el Distrito de Riego 052 “Durango”.

CONCLUSIONES GENERALES

La parametrización del modelo AquaCrop en diferentes regiones agrícolas de México resultó aceptable, puesto que los rendimientos y crecimiento de los cultivos estudiados pudieron ser simulados con el modelo para calibrar y validar los parámetros necesarios. Con ello, se pueden realizar estudios futuros sobre la predicción de cosechas y comportamiento del cultivo bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica así como de manejo agronómico, con la finalidad de ofrecer alternativas a los productores en caso de establecer los cultivos en fechas fuera de la época de siembra recomendada y su viabilidad en el establecimiento con respecto al rendimiento potencial y esperado.

Resulta imperante hacer sinergias o alianzas con otras instituciones de investigación y enseñanza, debido a que se requiere difundir la investigación y sus resultados entre los actores involucrados en el sector agrícola. También para colaborar e intercambiar equipo para medir algunas variables requeridas en la parametrización del modelo AquaCrop, puesto que no se cuenta con la infraestructura adecuada para obtener información de campo y eso conlleva a realizar muestreos destructivos-manuales que requieren más tiempo en la determinación de los datos y la eliminación de plantas por el manejo que implica.

Es importante recibir capacitación sobre el manejo del modelo AquaCrop, aunque este requiere de pocos parámetros para su operación y funcionamiento. Por ejemplo, no conformar un archivo de clima de forma adecuada genera errores al momento de correr o ejecutar el modelo, lo cual significa retrasos en los trabajos que se desean llevar a cabo. Actualmente es complicado obtener información climática confiable y con datos constantes, puesto que la mayoría de las estaciones disponibles están con datos faltantes o en el peor de los casos, se registran como discontinuadas o sin operar, a pesar de que se tiene su registro para consulta.

LITERATURA CITADA

- Abedinpour M., A. Sarangi, T. B. S. Rajput, M. Singh, H. Pathak and T. Ahmad. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110:55-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Abendinpour M., A. Sarangi, T. B. S. Rajput and M. Singh. 2016. Prediction of maize yield under future water availability scenarios using the AquaCrop model. *Journal of Agricultural Science*. 152:558-574. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000094>
- Ahmadi S. H., E. Mosallaepour, A. A. Kamgar-Haghighi and A. R. Sepaskhah. 2015. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resources Management*. 29:2837-2853. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>
- Alva A. K., J. Marcos, C. Stockle, V. R. Reddy and D. J. Timlin. 2010. A crop simulation model for predicting yield and fate of nitrogen in irrigated potato rotation cropping system. *Journal of Crop Improvement*. 24:142-152. <https://doi.org/10.1080/15427520903581239>
- Arce-Romero A., A. I. Monterroso-Rivas, J. D. Gómez-Díaz, M. Á. Palacios-Mendoza, E. N. Navarro-Salas, J. López-Blanco and A. C. Conde-Álvarez. 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>
- Candelaria M. B, O. Ruiz R., F. Gallardo L., P. Pérez H., Á. Martínez B. y L. Vargas V. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14:999-1010
- Cavero J., I. Farre, P. Debacke and J. M. Faci. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal*. 92:679-690. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.924679x>
- 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 (SEMARNAT). Ciudad de México, México. 149 p.
- Craufurd P. Q., V. Vadez, S.V. Krishna J., P.V. Vara P. and M. Zaman-Allah. 2013. Crop science experiments designed to inform crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 170: 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.003>
- de la Casa A., G. Ovando, L. Bressanini y J. Martínez. 2013. Aquacrop model calibration in potato and its use to estimate yield variability under field conditions. *Atmospheric and Climate Sciences*. 3:397-407. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2013.33041>

- de la Casa A., G. Ovando, L. Bressanini y J. Martínez. 2014. Estimación del rendimiento potencial de papa en Córdoba, Argentina, a partir de la eficiencia en el uso de la radiación y de la productividad del agua. *Agriscientia*. 31:75-91. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v31.n2.16535>
- Doorenbos J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage*. Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. 193 p.
- FAO, Food and Agriculture Organization. 2017. AquaCrop: el modelo de productividad del agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA). Roma, Italia. 4 p. <https://www.fao.org/3/i7455s/i7455s.pdf>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- FAOSTAT, Food and Agriculture Organization Statistical. 2023. FAO Statistical Database 2022. Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- 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>
- FIRA, Fidecomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. 2016. Panorama Agroalimentario - Maíz 2016. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Ciudad de México. 40 p.
- Fleisher D. H., D. J. Timlin, Y. Yang and V. R. Reddy. 2010. Simulation of potato gas exchange rates using SPUDSIM. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:432-442. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.005>
- Flores-Gallardo H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Mejía-Sáenz y E. Sifuentes-Ibarra. 2012. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*. 30:59-67.
- 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 # 74. Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, México. 28 p. ISBN: 978-607-37-0317-8.
- Flores-Gallardo H., W. Ojeda-Bustamante, A. Ruiz-García y H. Flores-Magdaleno. 2015. AquaCrop: una herramienta para generar calendarios de riego. *In*: W. Ojeda-Bustamante y J. Flores-Velázquez (eds.). Calendarización del riego: teoría y práctica. Anexo E. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Pp. E1-E22. ISBN: 978-607-9368-40-1.

- Flores-Gallardo H., A. Castillo-Rosales, S. Santana-Espinoza, R. Jiménez-Ocampo y P. A. Domínguez-Martínez. 2017. Recomendaciones para la producción de grano y forraje de maíz bajo riego en Durango. Folleto técnico # 96. INIFAP-CIRNOC-CEVAG. 32 p. ISBN: 978-607-37-0922-4.
- Flores-Magdaleno H., H. Flores-Gallardo y W. Ojeda-Bustamante. 2014. Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 37:149-157. <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.2.149>
- Fullana B. C., y E. Urquía G. 2009. Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinaria de investigación. *Encuentros Multidisciplinarios*. 32:1-11.
- Gadedjisso-Tossou A., T. Avellán and N. Schütze. 2019. An economic-based evaluation of maize production under deficit and supplemental irrigation for smallholder farmers in Northern Togo, West Africa. *Resources*. 8:175. <https://doi.org/10.3390/resources8040175>
- Gálvez G., A. Sigarrosa, T. López y J. Fernández. 2010. Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos. *Cultivos Tropicales*. 31:60-65.
- García M. E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4a. ed. Enriqueta García de Miranda. México, D. F. 217 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.
- Greaves G. E. and Y. M. Wang. 2016. Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water*. 8:557. <https://doi.org/10.3390/w8120557>
- Greaves G. E. and Y. M. Wang. 2017. Identifying irrigation strategies for improved agricultural water productivity in irrigated maize production through crop simulation modelling. *Sustainability*. 9:630. <https://doi.org/10.3390/su9040630>
- He Q., S. Li, D. Hu, Y. Wang and X. Cong. 2021. Performance assessment of the AquaCrop model for film-mulched maize with full drip irrigation in Northwest China. *Irrigation Science*. 39:277-292. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00705-z>
- 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>
- Hernández N., F. Soto y A. Caballero. 2009. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*. 30:73-82.
- Hodges T., S. L. Johnson and B. S. Johnson. 1992. A modular structure for crop simulation models: implemented in the SIMPOTATO model. *Agronomy Journal* 84:911-915. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400050027x>

- Hoogenboom, G., C. H. Porter, V. Shelia, K. J. Boote, U. Singh, J. W. White, W. Pavan, F. A. A. Oliveira, L. P. Moreno-Cadena, J. I. Lizaso, S. Asseng, D. N. L. Pequeno, B. A. Kimball, P. D. Alderman, K. R. Thorp, M. R. Jones, S. V. Cuadra, M. S. Vianna, F. J. Villalobos, T. B. Ferreira, W. D. Batchelor, J. Koo, L. A. Hunt and J. W. Jones. 2021. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). Version 4.8. DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA. <https://dssat.net/>
- 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. Consultado en línea 04/08/2017. <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>
- Iñiguez-Covarrubias M., W. Ojeda-Bustamante y A. Rojano-Aguilar. 2011. Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de UNCuyo*. 43:175-191.
- Jones J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman and J. T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal Agronomy*. 18:235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- 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.
- Martínez R., A. y A. Leyva G. 2014. La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales* 35:11-20.
- Medina G. G., G. Díaz P., J. López H., J. A. Ruiz C. y M. Marín S. 2005. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Período 1961-2003). Libro Técnico Núm. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, México. 224 p.
- Mejía M. G. y J. A. Castellanos S. 2018. Costos de producción y rentabilidad del cultivo de la papa en Zacapoaxtla, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9:1651-1661. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1721>
- Montoya F., D. Camargo, J. F. Ortega, J. I. Córcoles and A. Domínguez. 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 164:267-280. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, D. C. Slack and M. Carrillo. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage* 53: 251-261. <https://doi.org/10.1002/ird.134>

- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*. 40:13-25.
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, M. Iñiguez-Covarrubias y M. J. Montero-Martínez. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*. 45:1-11.
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, A. Rojano-Aguilar y M. Iñiguez-Covarrubias. 2012. Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. *In*: P. F. Martínez-Austria y C. Patiño-Gómez (eds.). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México*. Vol. IV. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Pp. 71-119.
- Porras-Jorge R., L. Ramos-Fernández, W. Ojeda-Bustamante and R. E. Ontiveros-Capurata. 2020. Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*. 11:309-321. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2009. AquaCrop. Reference Manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 218 p.
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2009a. AquaCrop. Reference Manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 218 p.
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2009b. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *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 (FAO). Rome, Italy. 667 p.
- Razzaghi F., Z. Zhou, M. N. Andersen and F. Plauborg. 2017. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*. 191:113-123. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.008>
- Rosales-Serna R., F. J. Ibarra-Pérez y E. I. Cuéllar-Robles. 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., Flores-Gallardo H. and J. C. López-González. 2016. Water regime effects on phenology and seed yield of common bean in Durango, México. *Annual Report Bean Improvement Cooperative*. 59:241-242.
- Rosales-Serna R., H. Flores-Gallardo, C. A. Nava-Berumen y A. I. 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, S. Santana-Espinoza 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. 2004. Situación actual y perspectivas del maíz en México 1990-2004. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). México, D. F. 102 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2017. Anuario estadístico de la producción agrícola. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). Consultado en línea 15/11/2017:
http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2020. Panorama agroalimentario 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Ciudad de México, México. 196 p.
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2022. Expectativas Agroalimentarias 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Ciudad de México, México. 60 p.
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2022a. Expectativas Agroalimentarias 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Ciudad de México, México. 60 p.
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2022b. Panorama Agroalimentario 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). 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, M. S. Al-Wahibi 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>
- Sifuentes I. E., W. Ojeda B., C. Mendoza P., J. Macías C., J. del R. Rúelas I. y M. A. Inzunza I. 2013. Nutrición del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) considerando variabilidad climática en el "Valle del Fuerte", Sinaloa, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 4:585-597. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i4.1191>

- Sifuentes I. E., J. del R. Ruelas I., J. Macías C., I. Talamantes C., C. A. Palacios M. y B. E. Valenzuela L. 2015. Fenología y tiempo en el manejo del riego y fertilización del cultivo de papa. *Biocencia*. 17:42-48. <https://doi.org/10.18633/bt.v17i3.218>
- 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>
- Steduto P., T. C. Hsiao, E. Fereres and D. Raes. 2012. Crop yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper # 66*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. 500 p.
- Stricevic R., M. Cosic, N. Djurovic, B. Pejic and L. Maksimovic. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98:1615-1621. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.011>
- 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.
- 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*. Chapter 3: Examination and Description of Soil Profiles. Lincoln, Nebraska, United States of America. Pp: 122-125.
- 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>
- Wanjura, D. F. and D. R. Upchurch. 2000. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *Transactions of the ASAE*. 43:867-875. <https://doi.org/10.13031/2013.2982>
- 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)