

Modelación con *AquaCrop* de la fecha óptima de siembra y requerimientos hídricos del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

Yarisbel Gómez Masjuan¹, Norge Tornés Olivera², Oscar Nemesio Brown Manrique³, Arnaldo Manuel Guerrero Alega⁴ & Gerardo Sánchez Aguilar⁵

¹ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7729-0032>, Universidad de Granma, Departamento de Agronomía, Bayamo, Granma, Cuba, ²ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5577-5079>, Universidad de Granma, Departamento de Agronomía, Bayamo, Granma, Cuba, ³ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3713-3408>, Universidad de Ciego de Ávila, Centro de Estudios Hidrotecnicos, Ciego de Ávila, Cuba, ⁴ORCID <https://orcid.org/0009-0008-6920-7508>, Universidad de Granma, Departamento de Agronomía, Granma, Cuba, ⁵ORCID <https://orcid.org/0009-0001-5759-8424>, Universidad de Granma, Departamento de Agronomía, Bayamo, Granma, Cuba.

Citación: Gómez Masjuan, Y., Tornés Olivera, N., Brown Manrique, O. N., Guerrero Alega, A. M., & Sánchez Aguilar, G. (2024). Modelación con *AquaCrop* de la fecha óptima de siembra y requerimientos hídricos del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agrisost*, 30, 1–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10655272>

Recibido: 15 diciembre 2023

Aceptado: 3 febrero 2024

Publicado: 13 febrero 2024

Financiamiento: No se declara.

Conflictos de interés: No se declaran.

Correo electrónico: varisbelgomezmasjuan1980@gmail.com

Resumen

Contexto: La fenología, es quizá, el factor biológico más importante en la programación del riego. Aunque las etapas del cultivo se definen en días calendario, sus valores cambian según las condiciones climáticas. Para hacer más precisa la programación del riego, se ha incorporado el concepto grados día ($^{\circ}D$), el cual ha demostrado ser una herramienta, que se puede aplicar tanto en parcelas como en grandes zonas de riego, incluso en condiciones variables de clima y de disponibilidad de agua.

Objetivo: El objetivo de la investigación fue determinar mediante modelación con *AquaCrop*, la fecha óptima de siembra y las necesidades de riego del cultivo de frijol común, usando el concepto de grados días.

Métodos: Para la modelación con *AquaCrop* se utilizó el cultivar Buenaventura, el cual tiene un rendimiento potencial de $3,00 t ha^{-1}$ y se recomienda su siembra desde septiembre hasta enero, se utilizaron fechas de siembra con intervalos de 10 días.

Resultados: Las fechas de siembra pueden provocar una diferencia de 16 días en el ciclo del cultivo. El rendimiento óptimo se obtiene cuando el cultivo se siembra el 20 de noviembre, el cual puede alcanzar las $3 t ha^{-1}$ y un ciclo de 78 días.

Conclusiones: Se comprobó que, como tendencia, el rendimiento disminuye con la reducción del ciclo del cultivo. Los indicadores *EUAR* y *PAR*, no son óptimos en la fecha de siembra donde se obtiene el mayor rendimiento y son indicadores que permiten gestionar de forma oportuna el sistema de riego y representan el valor económico del agua en la producción.

Palabras clave: *grados día, fenología, rendimiento.*

Modeling with *AquaCrop* of the optimal sowing date and water requirements of the dry bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.)

Abstract

Context: Phenology is perhaps the most important biological factor in irrigation programming. Although the stages of cultivation are defined in calendar days, their values change depending on weather conditions. To make irrigation programming more precise, the degree day ($^{\circ}D$) concept has been incorporated, which has proven to be a tool that can be applied both in plots and in large irrigation areas, even in variable climate and weather conditions of water availability.

Objective: The objective of the research was to determine, through modeling with *AquaCrop*, the optimal sowing date and irrigation needs of the common bean crop, using the concept of degree days.

Methods: For modeling with *AquaCrop*, the Buenaventura cultivar was used, which has a potential yield of $3,00 \text{ t ha}^{-1}$ and is recommended for sowing from September to January, sowing dates with intervals of 10 days were used.

Results: Sowing dates can cause a difference of 16 days in the crop cycle. The optimal yield is obtained when the crop is sown on November 20, which can reach 3 t ha^{-1} and a cycle of 78 days.

Conclusions: It was found that, as a trend, yield decreases with the reduction of the crop cycle. The *EUAR* and *PAR* indicators are not optimal at the optimal planting date and are indicators that allow to management timely the irrigation system and represent the economic value of water in production.

Key words: *degree days, phenology, crop yield.*

Introducción

El cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), es uno de los de mayor importancia en Cuba. En el año 2020 se cosecharon 73 000 *ha*, con una producción total de 65 000 t y rendimiento agrícola promedio de $0,89 \text{ t ha}^{-1}$ (ONEI, 2021). El cambio climático se ha convertido en un factor decisivo para la estabilidad del rendimiento agrícola (Barikara et al., 2022; Boamaha et al., 2024). En los últimos años son más evidentes los eventos meteorológicos extremos, que han modificado los patrones globales, entre ellos, está la temperatura (Arivelarasan, et al., 2023; Amberber y Fantu, 2024; Ruiz et al., 2018). Las condiciones ambientales (agua, luz, temperatura y elementos nutritivos) influyen positiva o negativamente en el desarrollo del cultivo. Estos componentes, según fecha de siembra, modifican el entorno y alteran la producción de materia seca, el rendimiento y la fenología del cultivo (Mompremier et al., 2021).

La fenología de los cultivos, es quizá, el factor biológico más importante en la programación del riego (Sifuentes et al., 2021). Aunque es común definir las etapas en días calendario, este concepto carece de precisión, al cambiar las condiciones climáticas de las existentes en el momento que fueron definidas. Por ejemplo, ciclos más fríos retardan el desarrollo fenológico, mientras que ciclos más calientes los aceleran. Ante esta variación, se desfasaría la duración pronosticada y observada para cada una de las etapas fenológicas. La incorporación del concepto grados día ($^{\circ}D$) para programación de los riegos, ha demostrado ser una excelente herramienta, que se puede aplicar tanto en parcelas como en grandes zonas de riego, incluso en condiciones variables de clima y de disponibilidad de agua.

El uso de modelos para la predicción de rendimiento, tiene como objetivos principales conocer con mayor certeza las relaciones clima-suelo-cultivo y generar información para la planificación y manejo de la producción ante la variabilidad climática. El modelo *AquaCrop* (Raes et al., 2022) es un modelo general de aplicación empírica de cultivos, el mismo se ha utilizado en varias zonas del mundo, bajo diferentes condiciones ambientales (Arivelarasan et al., 2023; Nunes et al., 2021; Mengna et al., 2023; Sifuentes-Ibarra et al., 2021; Stricevic et al., 2023) y se

considera una herramienta importante de investigación y apoyo para la toma de decisiones. Es utilizado también para evaluar y predecir los efectos del cambio climático en cultivos, después de una etapa de calibración experimental.

Con base en esto, es posible generar recomendaciones, para diseñar estrategias de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático, en las zonas de riego; sin embargo, en Cuba existen pocos estudios (Tornés et al., 2016; González-Robaina et al., 2019; Tornés et al., 2021) del modelo aplicado al cultivo de frijol y no se reportan estudios de fecha óptima de siembra en función de los grados día. El objetivo de la investigación fue determinar mediante modelación con *AquaCrop*, la fecha óptima de siembra y las necesidades de riego del cultivo de frijol común, usando el concepto de grados días.

Materiales y Métodos

Localización del ensayo experimental

La investigación se desarrolló entre los meses de noviembre de 2021 a marzo de 2022. El área de la investigación pertenece a la UBPC Grito de Yara, perteneciente a la Empresa Agropecuaria Paquito Rosales de Granma, Cuba, la cual se encuentra ubicada a los $20^{\circ} 25' 02''$ de Latitud N y a los $76^{\circ} 53' 27''$ de Longitud O con una altura de 6 *m.s.n.m.*

Metodología de campo

El experimento se desarrolló sobre un suelo Fluvisol (Hernández-Jiménez et al., 2015), con un contenido de materia orgánica menor de 2 %. Se estudió la variedad de frijol común Buenaventura, la cual tiene un rendimiento potencial de 3 t ha^{-1} , el hábito de crecimiento es determinado (Tipo II), el ciclo es de 79 *d* y, se recomienda su siembra desde septiembre hasta enero. Se utilizó un marco de siembra de 0,05 *m* entre plantas y 0,45 *m* entre hileras. El área se regó con una máquina de pivote central marca Bayatusa 2000. La programación del riego se realizó mediante el método del potencial hídrico del suelo (tensiómetros). Los datos de temperatura mínima, máxima y media fueron proporcionados por la Estación Agrometeorológica de Veguitas, perteneciente a la red de estaciones del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), la

cual está ubicada a una distancia menor de 2 km de la parcela experimental.

Parametrización del modelo *AquaCrop*

En la aplicación del modelo *AquaCrop*, se utilizó un grupo de parámetros conservativos que pueden considerarse invariables, independientemente de las zonas donde se desarrollan los cultivos (Raes et al., 2022). En la Tabla 1 se presentan los valores utilizados en esta investigación. Para evaluar el modelo en las condiciones específicas de la localidad se utilizaron los parámetros recomendados por Raes et al. (2022): fecha de plantación, densidad de plantación, *plantas ha⁻¹*; geminación, °D; cobertura foliar máxima, % (se determinó según se describe en Tornés et al., 2016); inicio de la floración, °D; duración de la floración, °D; inicio de la senescencia, °D; maduración, °D; profundidad efectiva mínima de las raíces, *m*; profundidad efectiva máxima de las raíces, *m*; rendimiento, *t ha⁻¹*. El modelo *AquaCrop* se ejecutó para la estación del año típico promedio, usando la función Generación del Calendario de Riego.

Se utilizaron fechas de siembra (1 de septiembre hasta 29 de enero) con intervalos de 10 días, para determinar los días necesarios para alcanzar la madurez fisiológica; la fecha óptima de siembra, tomando como base el rendimiento y las necesidades de riego. Los datos climáticos pertenecen a una serie histórica de los últimos 30 años. Los grados día de crecimiento se calcularon según los algoritmos utilizados por el modelo *AquaCrop*.

Cálculo de indicadores de uso del agua

Se determinó, además, la eficiencia en el uso del agua de riego (*EUA*) y la productividad del agua de riego (*PAR*):

$$EUA = \frac{NNR}{R} \tag{1}$$

$$PAR = \frac{R}{NNR} \tag{2}$$

donde: *EUA* es la eficiencia en el uso del agua *m³ kg⁻¹*, *NNR* las necesidades netas de riego, *m³ ha⁻¹*; *R* el rendimiento, *kg ha⁻¹*; *PAR* la productividad del agua de riego, *kg m⁻³*.

Tabla 1. Parámetros conservativos del cultivo del frijol usados en la simulación

Descripción	Valor	Unidad
Temperatura base	9	°C
Temperatura superior	30	°C
Cobertura foliar a 90 % de	10	cm ²

germinación		/planta
Umbral superior para la expansión foliar	0,15	%TAW
Umbral inferior para la expansión foliar	0,65	%TAW
Umbral para el cierre estomático	0,60	%TAW
Fracción de agotamiento para la senescencia	0,70	%TAW
Productividad del agua normalizada para CO₂	15	g m ⁻²
Índice de cosecha (HI) de referencia	40	%

Nota: %TAW significa porcentaje del total de humedad disponible.

Resultados y discusión

Análisis de los parámetros específicos

La densidad poblacional, es la máxima obtenida con siembra mecanizada (Tabla 2). Los valores obtenidos de los parámetros relacionados con la fenología del cultivo, variaron entre 55,2 °D (Germinación) y 1005 °D (Maduración).

Tabla 2. Parámetros del cultivo específicos de la localidad para evaluar el modelo

Parámetros del cultivo	Valor	Unidad
Densidad de plantación	44 444	<i>plantas ha⁻¹</i>
Geminación	55,2	°D
Inicio de la floración	365	°D
Duración de la floración	540	°D
Inicio de la senescencia	632	°D
Maduración	1005	°D
Cobertura foliar máxima	100	%
Profundidad efectiva mínima de las raíces	0,10	<i>m</i>
Profundidad efectiva máxima de las raíces	0,20	<i>m</i>
Rendimiento	2,95	<i>t ha⁻¹</i>

Estos valores son inferiores a los de referencia 59 °D (Germinación) y 1298 °D (Maduración) (Raes et al., 2022). Igual tendencia se observó en la profundidad efectiva máxima de las raíces, observada (0,2 *m*) y referencia (1,7 *m*). Lo anteriormente analizado, demuestra la importancia de realizar la parametrización del modelo con datos obtenidos en el lugar específico donde se desea simular con *AquaCrop*. Es necesario señalar que, el rendimiento obtenido (2,95 *t ha⁻¹*) estuvo muy cerca del potencial del cultivo (3,00 *t ha⁻¹*), lo cual demuestra que las condiciones de producción fueron adecuadas para el desarrollo del cultivo. Tornés et al. (2016) reportaron valores similares con la variedad Delicias 364, en la misma zona de estudio y fecha de siembra.

Análisis de la influencia de las fechas de siembra en el ciclo y el rendimiento

A partir del primero de septiembre, se observa una tendencia creciente para alcanzar los días necesarios a madurez fisiológica (Tabla 3). El ciclo más corto del cultivo (64 días), se alcanza cuando la siembra se realiza el primero de septiembre, el ciclo más largo del cultivo (80 días) se alcanza cuando la siembra se realiza entre el 20 y 30 diciembre, después del 30 diciembre el ciclo del cultivo comienza a disminuir.

La diferencia entre el ciclo más corto y el más largo es de 16 días.

Cabe resaltar que, dentro del periodo, el ciclo del cultivo en los meses más calurosos (septiembre-octubre) es más corto (69 días) que en los meses más fríos (noviembre-enero) (78 días). El resultado permitió comprobar y cuantificar el efecto de la variabilidad climática (temperatura) en el desarrollo fisiológico del cultivo y la importancia para la programación del riego.

Tabla 3. Influencia de la fecha de siembra sobre el ciclo y el rendimiento del cultivo

	Fecha de siembra															
	1-sep	11-sep	21-sep	1-oct	11-oct	21-oct	31-oct	10-nov	20-nov	30-nov	10-dic	20-dic	30-dic	9-ene	19-ene	29-ene
DMF	79	77	77	64	65	67	69	71	73	76	77	78	79	79	80	80
R (t/ha)	2,93	2,93	2,70	2,27	2,42	2,52	2,62	2,62	2,83	2,81	2,95	3,00	2,98	2,97	2,96	2,96

Nota: DMF significa días a maduración fisiológica.

El conocimiento de la duración exacta de las fases de desarrollo y su interacción con los factores ambientales, es esencial para alcanzar los máximos rendimientos en las plantas cultivadas (Raes et al., 2023; Zhang et al., 2023), ya que determinan factores como la absorción de nutrientes y el llenado de frutos que inciden directamente sobre la productividad del cultivo.

siembra no influyen, solamente, en el ciclo y el rendimiento del cultivo, sino también en los indicadores económicos.

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

La variabilidad observada, puede estar relacionada con la respuesta del cultivo las variables meteorológicas, como las temperaturas y precipitaciones, las que juegan un papel fundamental en la productividad del mismo.

El rendimiento agrícola tuvo un comportamiento similar a los días necesarios para alcanzar la madurez fisiológica (Tabla 3), lo cual permite afirmar que, como tendencia, a ciclos más cortos corresponden rendimientos más bajos.

De forma general, debe destacarse que, las fechas de siembra varían el ciclo del cultivo debido, fundamentalmente, a las variaciones de temperatura y en consecuencia influyen en el rendimiento el cultivo. Ruiz et al. (2018) son del criterio que, aunque el rendimiento de un cultivo es afectado por un grupo complejo de factores, los de mayor impacto son: el agua, la radiación y la temperatura estacional. La relación entre estos factores, el crecimiento y rendimiento del cultivo estará en función del clima en que éste se desarrolle.

Se determinó como fecha óptima de siembra el 20 de noviembre con un rendimiento esperado de 3 t ha⁻¹, al cual corresponde un ciclo de 78 días. la diferencia entre el rendimiento mínimo esperado (2,27 t ha⁻¹) con fecha de siembra primero de septiembre y el rendimiento óptimo (3 t ha⁻¹) es de 0,73 t ha⁻¹. Es necesario señalar que, las fechas de

Análisis de las necesidades netas de riego, eficiencia y productividad del agua de riego

Las necesidades netas de riego también muestran una tendencia creciente a partir del primero de septiembre (Tabla 4). Los valores oscilan entre 74,70 mm y 546,60 mm, para el primero de septiembre y el 29 de enero, respectivamente, lo cual se corresponde con las características de las precipitaciones en este periodo. A partir del primero de septiembre, se observa una tendencia creciente de las necesidades netas de riego.

El requerimiento neto de riego menor (74,70 mm), se alcanza cuando la siembra se realiza el primero de septiembre. El requerimiento neto de riego mayor (546,60 mm), se alcanza cuando la siembra se realiza el 29 de enero. En términos relativos, se requiere 7,3 veces más agua en el mes de enero en comparación con septiembre. Es necesario señalar que, las necesidades netas de riego promedio, en los meses más calurosos (septiembre-octubre) es de 149,00 mm, mientras que, en los meses más fríos (noviembre-enero) es de 359,00 mm. Este análisis confirma que, la temperatura es el factor climático de mayor influencia en el rendimiento del cultivo, es de decir, en los meses de mayor precipitación (temperaturas más altas) se obtiene menor rendimiento.

Los resultados obtenidos en esta investigación, son similares a los reportados por González-Robaina et

al. (2019) trabajando con el modelo *AquaCrop*, para el cultivo de frijol, los autores informan que el mejor rendimiento se puede obtener aplicando láminas de riego entre 216,00 y 247,90 mm, lo que supone sembrar entre el 10 y el 30 de noviembre (Tabla 4).

Rodríguez-Pérez et al. (2023) reportan valores de las necesidades netas del cultivo de 321 mm. Los requerimientos determinados en esta investigación para el mes de enero, son superiores a los reportados por los autores citados anteriormente. Las diferencias están determinadas por las características climáticas de cada zona y por los periodos analizados en cada investigación.

Tabla 4. Necesidades netas de riego, eficiencia y productividad del agua de riego

F.S	Necesidades netas de riego (mm)									Total mm	EUA m ³ kg ⁻¹	PAR kg m ⁻³
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1-sep	15,20	2,60	4,10	3,90	6,20	24,30	18,40	0,00	0,00	74,70	0,33	3,04
11-sep	10,70	2,10	10,00	7,30	20,90	45,40	24,90	0,00	0,00	106,00	0,44	2,28
21-sep	9,80	2,20	13,60	20,80	45,40	49,60	30,20	0,00	0,00	171,60	0,68	1,47
1-oct	14,40	9,10	26,10	44,40	1,90	2,00	1,80	1,40	1,10	102,20	0,39	2,57
11-oct	17,70	22,80	46,60	49,20	44,40	3,90	8,30	1,10	0,00	194,00	0,74	1,35
21-oct	24,80	42,60	50,30	43,10	4,30	1,30	12,90	11,20	0,00	190,50	0,67	1,49
31-oct	0,00	39,50	46,00	44,90	7,30	1,70	6,20	35,40	22,40	203,40	0,72	1,38
10-nov	0,00	42,10	41,40	0,30	4,20	6,20	35,50	46,60	34,10	210,40	0,71	1,40
20-nov	0,00	38,90	7,20	4,80	10,50	34,50	47,10	58,10	29,40	230,50	0,77	1,30
30-nov	0,00	16,30	1,00	11,90	34,80	47,20	59,20	45,40	32,10	247,90	0,83	1,20
10-dic	10,60	8,30	37,00	46,10	59,50	45,50	49,00	31,50	7,90	295,40	0,99	1,01
20-dic	14,80	33,40	46,70	58,10	46,00	49,40	40,40	58,70	8,30	355,80	1,55	0,65
30-dic	14,70	33,40	46,70	58,10	46,00	49,40	40,40	58,70	8,30	355,70	1,20	0,83
9-ene	49,20	53,50	56,60	60,70	58,70	77,00	78,20	57,70	0,00	491,60	1,68	0,60
19-ene	0,00	53,60	52,30	59,70	57,90	74,90	78,60	84,10	39,90	501,00	1,71	0,59
29-ene	56,50	54,90	56,90	73,40	73,90	84,10	70,50	41,60	34,80	546,60	2,02	0,49

Nota: F.S significa fecha de siembra; EUAR eficiencia en el uso el agua de riego; PAR productividad del agua de riego.

Al analizar la eficiencia en el uso del agua, se observó que el primero de septiembre es la fecha de siembra que mejor valor presentó (0,33 m³ kg⁻¹) y el valor más desfavorable (2,02 m³ kg⁻¹) se alcanzó el 29 de enero. El valor obtenido en la eficiencia en el uso del agua para la fecha de siembra 20 de noviembre es de 0,77 m³ kg⁻¹, a partir de este resultado se infiere que, aunque el rendimiento es óptimo, no lo es la

eficiencia en el uso del agua, lo cual se atribuye a la forma de distribución de las precipitaciones.

El indicador productividad del agua de riego varía entre 3,04 y 0,49 kg m⁻³, valores que se corresponden con las fechas de siembra del primero de septiembre y 29 de enero, respectivamente. El valor de este indicador en la fecha de siembra óptima (20 de noviembre) es de 1,30 kg m⁻³. La diferencia entre el valor más alto de la PAR y el de la fecha óptima de

siembra es $1,74 \text{ kg m}^{-3}$. Los indicadores *PAR* no son óptimos en la fecha de siembra óptima, lo cual se debe a las características de las precipitaciones.

Otros autores (Ruiz et al., 2018), para analizar el desempeño agronómico del frijol con un ciclo de 128 días en diferentes escenarios climáticos, se apoyaron en el modelo *AquaCrop*, para simular productividad del agua en base a la lámina bruta e índice de cosecha, y encontraron valores entre $0,87\text{-}0,98 \text{ kg m}^{-3}$ y 35, respectivamente.

A partir de la comparación de los reportes de diferentes autores, se afirma que los valores de productividad de agua varían de acuerdo con la zona, manejo, cultivo, insumos externos o internos y todos los elementos que intervienen en el proceso de producción y que es un indicador que permite gestionar de forma oportuna el sistema de riego (Zhang et al., 2024), disminuir la cantidad de agua y energía consumida y mejorar la asignación de agua en el sistema agrícola, a su vez, representa la eficiencia de transformación en un bien de consumo con la aplicación de menor volumen de agua al sistema (Bekchanova, 2024). En términos generales se puede indicar que la productividad del agua representa el valor económico del agua en la producción.

Conclusiones

Se comprobó que, como tendencia, el rendimiento disminuye con la reducción del ciclo del cultivo, lográndose el óptimo con fecha de siembra el 20 de noviembre.

Los requerimientos de riego varían entre $74,7 \text{ mm}$ y $546,0 \text{ mm}$. Los indicadores asociados, *EUAR* y *PAR*, no son óptimos en la fecha óptima de siembra y son indicadores que permiten gestionar de forma oportuna el sistema de riego y representan el valor económico del agua en la producción.

Contribución de los autores

Yarisbel Gómez Masjuan: Conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, validación, papeles/redacción, borrador original, redacción, revisión y edición.

Norge Tornés Olivera: Curación de datos, supervisión, validación, papeles/redacción, borrador original, redacción, revisión y edición.

Oscar Nemesio Brown Manrique: Metodología, supervisión.

Arnaldo Manuel Guerrero Aleaga: Investigación.

Gerardo Sánchez Aguilar: Investigación.

Conflictos de interés

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses. La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos.

Referencias

- Amberber, D. M., & Fantu, K. (2024). Impacts of climate variability on the vegetable production of urban farmers in the Addis Ababa metropolitan area: Nexus of climate-smart agricultural technologies. *Climate Services*, 33, 10043. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100430>
- Arivelarasan, T., Manivasagam, V. S., Geethalakshmi, V. Bhuvaneshwari, K., Natarajan, K., Balasubramanian, M., Gwotham, R., & Muthurajan, R. (2023). How Far Will Climate Change Affect Future Food Security? An Inquiry into the Irrigated Rice System of Peninsular India. *Agriculture*, 13(551), 1-2. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030551>
- Barikara, U., Reddyb, K. S., Polisgowdarc, B. S., Maruthif, V., Satishkumarc, U., Ayyanagoudarc, M. S., Sathyanarayan, R., & Veereshe, H. (2022). Assessment of climate change impact on maize (*Zea mays* L.) through *AquaCrop* model in semi-arid alfisol of southern Telangana. *Agricultural Water Management*, 274, 10795. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107950>
- Bekchanova, M. (2024) Conveyance efficiency and irrigation water productivity under varying water supply conditions in arid lowlands of Central Asia. *Agricultural Water management*, 293, 108697. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108697>
- Boamaha, P. O., Onumah, J., Apam, B., Salifu T., Abunkudugu, A., A., & Alabil, S. A. (2024). Climate variability impact on crop evapotranspiration in the upper East region of Ghana. *Environmental Challenges*, 14, 100828. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100828>
- González-Robaina, F., López-Vargas, D., Cisneros-Zayas, E., Herrera-Puebla, J., & Cid-Lazo, G. (2019). Calibración y análisis de sensibilidad del modelo *AquaCrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo Compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 3-12.

- <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586262756001>
- Hernández-Jiménez, A., Pérez-Jiménez, J., Bosch-Infante, D., & Castro, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*. Ediciones INCA. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1504>
- Mengna, L., Shiwei, Zho., Shuaijie, S., Jiale, W., Yuhao, Y., Yangzhong, Wua., Fu, C., & Yongdeng, L. (2023). Climate-smart irrigation strategy can mitigate agricultural water consumption while ensuring food security under a changing climate. *Agricultural Water Management*, 292, 108663. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108663>
- Mompremier, R., Herb, Y., Hoogenbooma, G., Migliaccio, K., Muñoz-Carpenaa, R., Brymd, Z., Colberte, R.W., & Jeunee, W. (2021). Modeling the response of dry bean yield to irrigation water availability controlled by watershed hydrology. *Agricultural Water Management*, 243, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106429>
- Nunes, H. G., Farias, V.D., Sousa, D.P., Costa, D.L., Pinto J.V., Moura V.B., Teixeira, E.O., Lima, M. J., Ortega, F. S., & Sousa. P. O. (2021). Parameterization of the *AquaCrop* model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. *Agricultural Water Management*, 252, 106880. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106880>
- ONEI. (2021). Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca. En *Anuario Estadístico de Cuba 2020*. (Capítulo 9, ed. 2021). Autor. <https://www.onei.gob.cu/sites/default/files/publicaciones/2022-03/AEC%202020.pdf>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2022). Chapter 3 calculation procedures. En *AquaCrop Reference manual (Version 7.0)*. (pp. 1-175). FAO. <https://www.fao.org/3/br248e/br248e.pdf>
- Raes, D., Fereres, E., García Vila, M., Curnel, Y., Knoded, D., Çelik, S. K., Ucar, Y., Türk, M., & Wellens, J. (2023). Simulation of alfalfa yield with *AquaCrop*. *Agricultural Water Management*, 284, 108341. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108341>
- Rodríguez-Pérez, E., Placeres-Miranda, Z., & Cisneros-Zayas, E. (2023). Necesidades hídricas del frijol para las condiciones de “Laguna Blanca”, Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 13(2), 10-15. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586275348002.pdf>
- Ruiz, V., Sifuentes, E., Ojeda, W., & Macías, J. (2018). Adecuación de fechas de siembra por variabilidad climática en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) mediante *AquaCrop*, en Sinaloa”, En *IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2018*. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2164>
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Macías-Cervantes, J., Mendoza-Pérez, C., & Preciado-Rangel, P. (2021). Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. *Agrociencia*, 55(3), 209-226. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2414/2057>
- Stricevic, R., Lipovac, A., Djurovic, N., Sotonica, D., & Cosic, M. (2023). *AquaCrop* Model Performance in Yield, Biomass, and Water Requirement Simulations of Common Bean Grown under Different Irrigation Treatments and Sowing Periods. *Horticulturae*, 9(4), 507. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040507>
- Tornés, N., Brown, O., Gómez, Y., & Guerrero, A. M. (2016). Evaluación del modelo *AquaCrop* en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23-30. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v25n3/rcta03316.pdf>
- Tornés, N., Gómez, Y., Boicet, T., & Brown, O. (2021). Evaluación del modelo *AquaCrop* en condiciones de riego óptimo y deficitario en *Phaseolus vulgaris* L. *Centro Agrícola*, 48(2), 37-46. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v48n2/0253-5785-cag-48-02-37.pdf>
- Zhang, R. Zhu, M., Yehia Mady, A., Huang, M., Yan, X., & Guo, T. (2024). Effects of different long-term fertilization and cropping systems on crop yield, water balance components and water productivity in dryland farming. *Agricultural Water Management*, 292(2024), 108689. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108689>
- Zhang, T., Zuo, Q., Ma, N., Shi, J., Fan, Y., Wu, X., Wang, L., Xue, X., & Ben-Gal, A. (2023). Optimizing relative root-zone water depletion thresholds to maximize yield and water productivity of winter wheat using *AquaCrop*.

Agricultural Water Management 286, 108391.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108391>