

Predicción del rendimiento en el frijol para el escenario climático SSP1-2.6

Prediction of bean yield for the SSP1-2.6 climate scenario



<https://cu-id.com/2284/v14n1e02>

[✉]Liz Brenda Toledo-Pérez^{1*}, [✉]Felicita González-Robaina^{II}, [✉]Enrique Cisneros-Zayas^{II},
[✉]Luis Hirán Riverol-Marrero^{II}, [✉]Carmen Duarte-Díaz^{II}

¹Universidad Agraria de La Habana (UNAH), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{II}Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN: Los escenarios climáticos son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro. Estos escenarios representan distintos futuros bajo condiciones específicas y en un tiempo determinado. El objetivo de este estudio es predecir los rendimientos del frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado ante el escenario de cambio climático SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 con la utilización del modelo de simulación *AquaCrop*. Para la selección de los años hidrológicos se realizó el estudio de una serie de 28 años (2023-2050) para el periodo noviembre-abril (periodo de desarrollo de los cultivos) de cada modelo. Se compararon las precipitaciones anuales estimadas bajo el escenario SSP 1 2.6 por los tres modelos estudiados. El Mpi-esm1 estima los valores más altos de precipitaciones en 26 de los 28 años estudiados, y en 17 años valores por encima de los 1500 mm. Mientras que el modelo HadGEM3 estima 8 años menores a 1000 mm. Se evidencia la posibilidad de alcanzar rendimientos de 2,6 t·ha⁻¹ y productividad del agua de 1,1 kg·m⁻³ para el frijol, si el cultivo no se somete a ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura, y las precipitaciones son suficientes en este periodo poco lluvioso. Los resultados muestran al modelo *AquaCrop* como una alternativa viable para el análisis de la productividad en respuesta al agua disponible y evaluar el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos.

Palabras clave: modelo de simulación, AquaCrop, productividad del agua.

ABSTRACT: Climate scenarios are coherent and consistent descriptions of how the earth's climate system may change in the future. These scenarios represent different futures under specific conditions and at a certain time. The objective of this study is to predict bean yields in compacted Red Ferralitic soil under the SSP1-2.6 climate change scenario and the HadGEM3, Mpi-esm1 and Mri-esm2 models with the use of the *AquaCrop* simulation model. To select the hydrological years, a study of a series of 28 years (2023-2050) was carried out for the period November-April (crop development period) for each model. The annual rainfall estimated under the SSP1-2.6 scenario by the three models studied was compared. The Mpi-esm1 estimates the highest values of precipitation in 26 of the 28 years studied, and in 17 years values above 1500 mm. While the HadGEM3 model estimates 8 years less than 1000 mm. The possibility of achieving yields of 2,6 t·ha⁻¹ and water productivity of 1,1 kg·m⁻³ for beans, is evident, if the crop is not subjected to any type of limitation except plant genetics, solar radiation and temperature, and rainfall is sufficient in this dry period. The results show the *AquaCrop* model as a viable alternative for analyzing productivity in response to available water and evaluating the impact of climate change on crop yields.

Keywords: Simulation Model., AquaCrop, Water Productivity.

*Autora para correspondencia: Liz Brenda Toledo-Pérez, e-mail: lizbrendatoleadoperez@gmail.com.

Recibido: 20/06/2023

Aceptado: 08/12/2023

INTRODUCCIÓN

La predicción del rendimiento de cultivos ha sido un objetivo prioritario, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima-agua-suelo-cultivo, como para generar información que se pueda aprovechar en la planificación y manejo de la producción agropecuaria ([González-Robaina et al., 2019](#)).

[Hervis-Granda et al. \(2018\)](#) refieren que la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura frente a los impactos del clima futuro, es un tema de máxima prioridad para las instituciones y gobierno cubano; y es reconocido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático que las pequeñas islas tienen características que las hacen especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático ([I. E. del I. IPCC, 2000](#)).

Para analizar los diferentes impactos del cambio climático y debido a la alta incertidumbre respecto a las condiciones climáticas futuras, el IPCC aconseja trabajar con “escenarios”, los cuales son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro. No es un pronóstico, por el contrario, cada escenario es una imagen alternativa de cómo puede desarrollarse el futuro. Es una representación de probabilidad que indica cómo se comportará posiblemente el clima en una región, durante una cierta cantidad de años, tomando en cuenta datos históricos y algunas variables físicas ([Escoto-Castillo et al., 2017](#)).

Desde 2006, la comunidad científica ha desarrollado nuevos escenarios para mejorar el marco de análisis y evaluación de los impactos del cambio climático, con una visión más interdisciplinaria ([IPCC, 2014](#)).

Según [Escoto-Castillo et al. \(2017\)](#) y [OFA y CC \(2023\)](#) los SSP (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas, por el inglés Shared Socio Economic Pathways) describen 5 vías alternativas de la sociedad según la implementación o ausencias de políticas para frenar el cambio climático, contemplando diferentes opciones de desarrollo y emisiones en el año 2100 (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 y SSP5).

El escenario SSP1 (con narrativa de sustentabilidad) asume bajos desafíos para mitigación y la adaptación y proyecta una alternativa optimista en las tendencias de desarrollo humano, con inversiones similares en educación y salud (abordando los desafíos de adaptación). El desarrollo económico cambia rápidamente hacia tecnologías bajas de emisiones de carbono, e instituciones sólidas que facilitan la cooperación internacional (abordando los desafíos de la mitigación).

En particular, el SSP1-2.6 es un escenario que comienza en 2015 y tiene emisiones de GEI bajas, y emisiones de CO₂ que disminuyen hasta llegar a emisiones netas iguales a cero, alrededor o después de

2050, seguido de niveles variables de emisiones netas negativas de CO₂ ([Escoto-Castillo et al., 2017](#); [Januta, 2021](#)). Es un escenario optimista desarrollado con el fin de simular un desarrollo compatible con la meta de 2°C (es improbable que se supere un calentamiento global de 2 °C, temperatura estimada: 1,5 °C), camino hacia un mundo sostenible y verde (IPCC, 2021; [Muños, 2023](#)).

El modelo *AquaCrop* liberado por la FAO [Raes et al. \(2012\)](#) puede usarse como herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en ciclos y localidades diferentes ([Heng et al., 2009](#); [Hsiao et al., 2009](#); [Steduto et al., 2009](#)). Este modelo se ha calibrado con buen ajuste y resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo para varios cultivos (sorgo, papa, tomate, trigo, girasol, cebada, maíz, soya, frijol).

Además de simular satisfactoriamente el rendimiento agrícola, *AquaCrop* es un modelo que, a pesar de utilizar un conjunto menor de parámetros y principios en comparación con DSSAT, logra describir de forma simple y directa los procesos que determinan la producción agrícola del cultivo y de esta manera hace más fácil el manejo del mismo por parte de un público bastante amplio ([Hoogenboom et al., 2015](#)).

[Tornés-Olivera et al. \(2016\)](#) se auxiliaron del modelo *AquaCrop* para evaluar las variables: coberturas foliar, biomasa seca aérea y contenido total de humedad del suelo para el diseño y manejo del riego por surcos en el cultivo del frijol en suelos Aluviales de la UBPC Grito de Yara, Granma. Se demostró la capacidad de simular de forma satisfactoria estas variables en comparación con las variables observadas de forma experimental.

[Castillo-Iglesias et al. \(2020\)](#) utilizaron el modelo *AquaCrop* para predecir fechas óptimas de siembra y los rendimientos de maíz en suelo Ferralítico Rojo compactado en la Llanura Habana-Matanzas ante escenarios A2 de cambio climático. Los resultados muestran al modelo como una alternativa viable para seleccionar fechas de siembra óptima, reproducir la fenología y productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y variabilidad climática.

[González-Robaina et al. \(2019\)](#) calibraron y validaron el modelo *AquaCrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo en Alquizar, Artemisa. Los resultados de la calibración del modelo permitieron optimizar los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio.

El cultivo del frijol es uno de los granos más importantes para el consumo directo por los humanos y proporciona una fuente importante de proteínas (22%), vitaminas y minerales (Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Zn) ([Delgado et al., 2022](#)). En Cuba el frijol, junto con el arroz y las viandas, constituye un alimento de preferencia en la dieta cotidiana y forma parte de la estrategia nacional de incrementar sus producciones debido a su elevada demanda como grano básico de

importancia para garantizar una mayor seguridad y soberanía alimentaria.

El objetivo de este estudio es predecir los rendimientos del frijol en suelo Ferralítico Rojo compactado ante el escenario de cambio climático SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 con la utilización del modelo de simulación *AquaCrop*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El modelo *Aquacrop* fue calibrado y validado para frijol por [González et al. \(2019\)](#) con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (noviembre-marzo) en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric) en Alquízar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' O, altura sobre el nivel medio del mar 6 m, 12 km de la costa.

Una descripción minuciosa de las principales características de *AquaCrop* aparece en el Boletín de la FAO: Riego y Drenaje No.66 por [Steduto et al. \(2012\)](#); donde se explica detalladamente los conceptos básicos y los procedimientos fundamentales de cálculo, acompañados de descripciones adicionales relacionadas con los requerimientos de datos de entrada, la interfaz del usuario y los resultados del modelo.

Modulo clima

Para la obtención de estos datos se hizo uso de los valores climáticos del escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3 (Hadley Centre Global Environment Model versión 3), Mpi-esm1 (Max Planck Institute Earth System Model) y Mri-esm2 (Meteorological Research Institute), que presenta una resolución de 125 x 125 km. Se tomaron las variables: temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación, que representa el clima futuro para el área de estudio.

Para la selección de los años hidrológicos se realizó el estudio de una serie de 28 años (2023-2050) para el periodo noviembre-abril (periodo de desarrollo de los cultivos) de cada modelo, donde se determinó la probabilidad empírica a partir de la [expresión](#):

$$P = \frac{(m - 0,3)}{(n + 0,4)} \cdot 100$$

m: número de orden

n: número de miembros de la serie

Se clasificaron cada uno de los periodos de la serie en función de su respectiva probabilidad. El de probabilidad 25% denota un escenario húmedo, el 50% medio y 75% seco, según [Pérez & Álvarez \(2005\)](#).

En la [Tabla 1](#) se resumen los parámetros de entrada al modelo *AquaCrop* obtenidos en estudios precedentes de [González-Robaina et al. \(2019\)](#) y que servirán de entrada a todas las simulaciones que se realizarán en este estudio.

El índice de cosecha (HI) considerado fue de 33%, por ser el valor más común obtenido bajo condiciones óptimas de desarrollo durante la calibración del modelo para frijol. Este valor se encuentra en el rango (0,3 a 0,5) que propone [Wani et al. \(2012\)](#).

Módulo de manejo del Cultivo

Para la simulación, el manejo del cultivo se consideró bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nutrientes y que las únicas variables que afectaron el desarrollo fueron las condiciones climáticas del escenario climático SSP1-2.6 y los 3 modelos seleccionados (HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2).

Manejo del riego

El método de aplicación del agua fue aspersión y para definir calendarios en términos de tiempo y cantidad de agua para cada período climático considerando el escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi y Mri-esm2 se utilizó el programa CROPWAT (versión 8.0). Este software permite gestionar programas de riego tanto en condiciones de secano como de irrigación, por lo que se empleó para determinar la evapotranspiración de referencia por el método de la FAO Penman-Monteith. La programación del riego se hizo de manera automática al llegar al 50% de la humedad disponible en el suelo ([Tabla 2](#)).

Modulo Suelo

Las propiedades físicas fundamentales para cada capa del perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado han sido actualizadas por [Cid \(1995\)](#) y [Cid et al. \(2011\)](#) y publicadas por [González-Robaina et al. \(2019\)](#), y conforman el fichero de suelo que se utilizó para todas las corridas del modelo.

De acuerdo con [López-Casteñ et al. \(1998\)](#) este suelo pertenece al grupo A de los suelos cubanos por clases hidrológicas (cultivo en hileras, surcos rectos y condiciones hidrológicas malas, debido a la compactación del suelo), por lo que se adoptó la curva número (CN) 71 para representar el escurrimiento superficial y se consideró que no existe estancamiento de agua en superficie. Para este estudio se optó por no evaluar de manera particular ninguna reducción del crecimiento asociada al nivel de fertilización, evitando la mayor complejidad que supone analizar la interacción entre la disponibilidad de agua y la nutrición de los cultivos.

TABLA 1. Parámetros de entrada modelo *AquaCrop* para frijol en suelo Ferralítico Rojo

Parámetro	Frijol
Densidad de plantación (plantas ha ⁻¹)	222000
Cobertura inicial del dosel	0,92
Expansión del dosel (% día ⁻¹)	10,8
Declive del dosel (% día ⁻¹)	10,9
Emergencia (días después de plantación)	7
Máxima cobertura del dosel (días después de plantación)	65
Inicio de la senescencia (días después de plantación)	80
Inicio de la floración (días después de plantación)	48
Duración florescencia (días)	20
Madurez (días después de plantación)	109
Máxima profundidad efectiva radicular (m)	0,40
Máxima profundidad radicular (días después de plantación)	68
Máxima evapotranspiración del cultivo	1,05
Productividad del agua normalizada (g m ⁻²)	14
Índice de cosecha (HI) (%)	33
Función de expansión del dosel	Sensible
P-upper	0,15
P-lower	0,65
Forma	3,0
Función del cierre de los estomas	Moderadamente tolerante
P-upper	0,7
Forma	3,0
Función de la senescencia temprana del dosel	Moderadamente tolerante
P-upper	0,7
Forma	3,0
Efectos de la fertilidad	No considerado
Efectos de la temperatura	No considerado
Curva número	71
Rapidez de la evaporación del agua (capa de superficie de tierra evaporándose: 0,04 m)	10
Capa impermeable de suelo (m)	0,4

TABLA 2. Parámetros de entrada para determinar las necesidades hídricas de frijol en suelo Ferralítico Rojo para las condiciones de estudio

Módulo	Variable	UM	Frijol
Evapotranspiración	Temperatura máxima y mínima	°C	Según período
	Humedad relativa	%	
	Velocidad del viento	m/s	
Suelo	Insolación	horas/luz	130
	Agua Disponible Total (ADT)	mm/m	
	Tasa máxima de infiltración	mm/días	
	Profundidad radicular máxima	cm	
	Agotamiento Inicial de la humedad del suelo	mm/m	
Cultivo	Fecha de siembra	-	17/nov
	Coefficiente de cultivo (kc)	-	Inicial: 0,50 Medio: 1,05 Final: 0,90
	Duración de las fases	días	Inicial: 20 Desarrollo: 30 Medio: 40 Final: 19
	Desarrollo de las raíces	m	Inicial: 0,30 Medio: 1,00
	Fracción de agotamiento crítico (p)	%	Inicial, medio 0,45 y final: 0,6
	Factor de respuesta del rendimiento (Ky)	-	Inicial: 0,2 Desarrollo: 0,6 Medio: 1,0 Final: 0,40 Total: 1,15
	Máxima Altura del cultivo	m	0,40

Condiciones iniciales

Se consideró un contenido de agua en el suelo de $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, que representa el 90% del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ hasta una profundidad de 0,40 m.

Aplicaciones

Se simuló la producción potencial ajustada para el del escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 en los tres años seleccionados del período 2023-2050 (húmedo, medio y seco). Los resultados que se van a presentar corresponden a las salidas del modelo *AquaCrop* una vez se han incorporado los cambios en el clima que se prevén de acuerdo a los escenarios de cambio climático contemplados, por lo que deben considerarse tan solo como indicativos y no como proyecciones precisas de lo que va a suceder en el futuro. No debe olvidarse la alta incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas futuras.

RESULTADOS

Caracterización del clima futuro para el escenario climático SSP1-2.6 en el período 2023-2050 (mediano plazo)

Utilizando los valores climáticos del escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, se presentan los resultados que representa el clima futuro para el área de estudio para cada uno de los modelos.

En la [figura 1](#) se comparan las precipitaciones anuales estimadas bajo el escenario SSP1-2.6 para el periodo 2023-2050 por los tres modelos estudiados. De los 3 modelos el Mpi-esm1 estima los valores más altos de precipitaciones en 26 de los 28 años estudiados, y en 17 años valores por encima de los 1500 mm. Mientras que el modelo HadGEM3 estima 8 años menores a 1000 mm.

Como puede observarse en la [Figura 1](#), bajo el escenario SSP1-2.6 y el modelo Hadgem, el comportamiento de las precipitaciones varió entre 600 y 1600 mm por año. Por encima de 1200 mm se observan solamente 8 años entre 2025-2028 y 2036-2039. Mientras que en el modelo Mpi-esm1 las precipitaciones fueron superiores a 1200 mm en todos los años con excepción del año 2043 con 1046 mm, y superiores a 1600 mm en 13 años. Bajo el escenario SSP1-2.6 y el modelo Mri-esm2 puede observarse que el comportamiento de las precipitaciones varió entre 700 y 1550 mm por año. Por encima de 1200 mm se observan solamente 10 años.

En la [Figura 2](#) se muestra la selección de los años hidrológicos, de la serie de 28 años (2023-2050) para el periodo noviembre-abril (periodo de desarrollo de los cultivos), del modelo Hadgem3 y de los periodos de la serie en función de su respectiva probabilidad (probabilidad 25% denota un escenario húmedo, el 50% medio y 75% seco).

En la [Figura 3](#) se muestra el balance hídrico en el período de crecimiento definido para los cultivos (noviembre- abril) entre 2023-2050 para el SSP1-2.6 y el modelo Hadgem3. Como se observa en el período húmedo, en los meses diciembre, enero y febrero, las precipitaciones superan la evapotranspiración del cultivo, en el año medio y en el seco solo en dos meses, por lo que pudieran esperarse un mayor número de riegos unido a una norma neta total superior para este escenario. Similar análisis se realizó para el resto de los modelos, mostrando igual comportamiento.

En las [Tablas 3, 4 y 5](#) se presentan los resultados obtenidos en el Cropwat de necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo del frijol para el escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2 en los periodos seleccionados. Esta información servirá de entrada al módulo de riego en el modelo de simulación *Aquacrop*.

El número de riegos para el frijol varió entre 5 y 7 riegos con normas parciales entre 20 y 30 mm y normas totales entre 118 y 175 mm, dependiendo del año y el modelo utilizado.

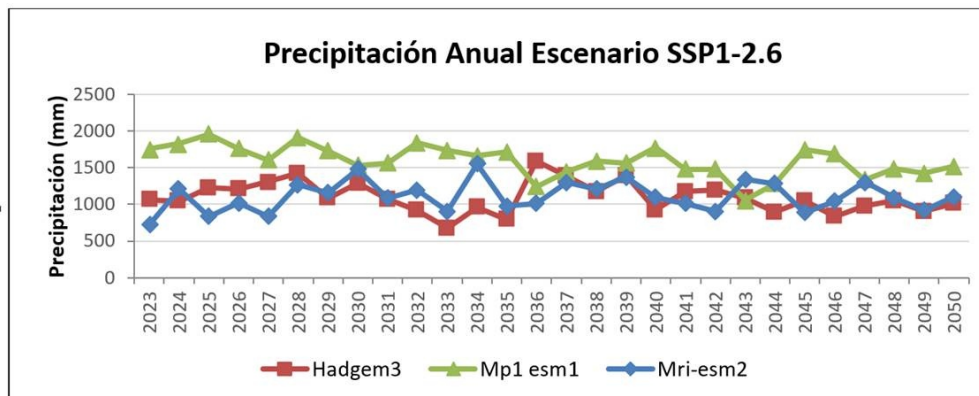
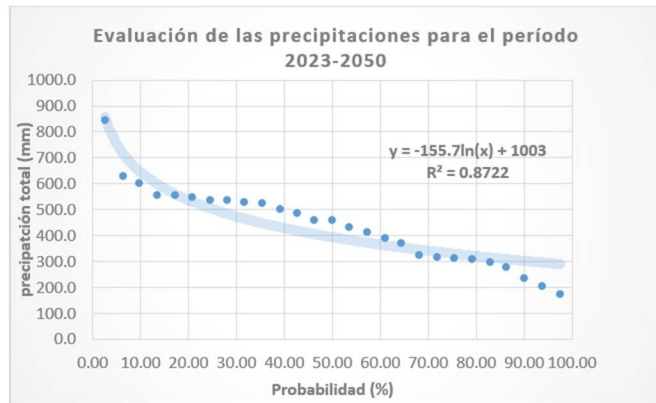


FIGURA 1. Comparación entre las precipitaciones anuales para el periodo 2023-2050 bajo el escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2.



Año hidrológico	Periodo nov-abril	Precipitación (mm)
Húmedo	2046-2047	532,65
Medio	2036-2037	457,03
Seco	2047-2048	312,45

FIGURA 2. Evaluación de las precipitaciones para el período 2023-2050 bajo el escenario SSP1-2.6 y el modelo Hadgem3 y selección de los periodos de la serie en función de su respectiva probabilidad.

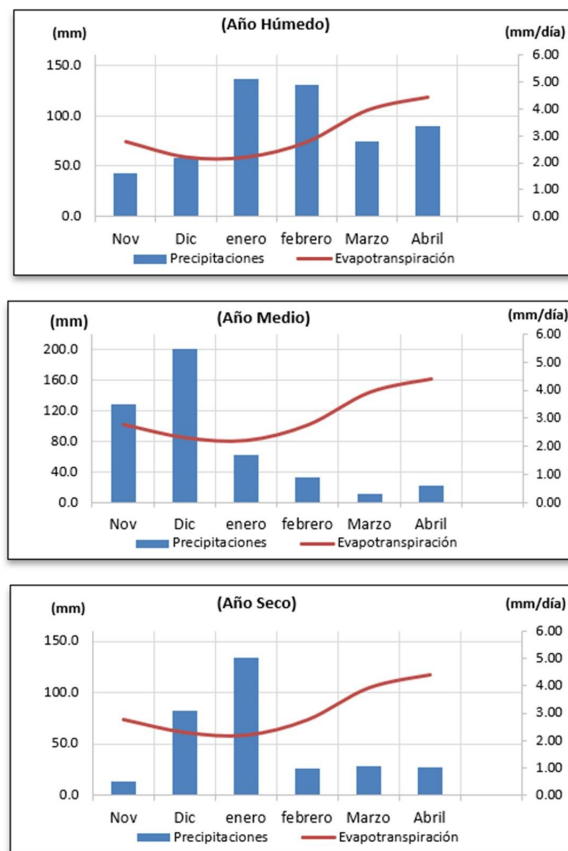


FIGURA 3. Balance Hídrico en el período noviembre- abril entre 2023-2050 para el escenario SSP1-2.6 y el modelo Hadgem3 en la zona de estudio.

TABLA 3. Necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de frijol para el escenario SSP1-2.6 y el modelo HadGEM3 en los períodos analizados, según el software Cropwat

Húmedo (2046-2047)		Medio (2036-2037)		Seco (2047-2048)	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	22.0	1	21.7	1	26.4
35	22.7	36	22.9	26	20.7
56	25.0	57	24.6	51	24.2
75	25.6	76	25.5	67	25.2
90	23.4	95	26.5	81	23.8
				93	25.0
				106	30.0
Norma total (mm)	118.8		121.2		175.3
No. riegos	5		5		7

TABLA 4. Necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de frijol para el escenario SSP1-2.6 y el modelo Mpi-esm1 en los períodos analizados, según el software Cropwat

Húmedo (2038-2039)		Medio (2028-2029)		Seco (2025-2026)	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	21.7	1	21.7	1	21.7
30	21.8	35	22.5	35	22.4
51	24.2	56	23.4	56	25.5
67	24.3	76	25.6	71	25.0
81	23.5	95	26.1	82	24.5
96	26.7			92	24.3
Norma total (mm)	142.3		119.3		143.5
No. riegos	6		5		6

TABLA 5. Necesidades hídricas y manejo del riego para el cultivo de frijol para el escenario SSP1-2.6 y el modelo Mri-esm2 en los períodos analizados, según el software Cropwat.

Húmedo (2043-2044)		Medio (2044-2045)		Seco (2027-2028)	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	26.4	1	21.8	1	23.0
16	19.6	36	23.4	35	21.8
46	25.0	57	24.5	56	23.6
64	23.9	76	24.8	75	25.0
78	25.1	96	27.7	88	24.0
91	25.4			100	28.3
Norma total (mm)	145.5		122.2		145.7
No. riegos	6		5		6

En la [Tabla 6](#) se presentan los resultados de la simulación con *Aquacrop* para frijol para el escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, en los períodos seleccionados.

Los valores de rendimiento (2.47-2.69 t ha⁻¹) y productividad del agua (0.98-1.13 kg m⁻³) están en el intervalo publicado en trabajos precedentes de [González-Robaina et al. \(2013, 2018\)](#). En el caso particular del rendimiento del frijol en experimentos de campo este varió entre 0,63-2,67 t ha⁻¹ y la productividad en base al rendimiento alcanzó valores de 0,97 kg m⁻³.

Los tres modelos estudiados simularon como promedio rendimientos similares de 2,57 t ha⁻¹ ([Figura 4](#)). En los tres años seleccionados fue

necesario aplicar entre 5 y 7 riegos para lograr rendimientos superiores a las 2,48 t ha⁻¹.

En la [Figura 5](#) se presenta la salida del modelo *AquaCrop* para producción potencial en el cultivo del frijol en el escenario SSP1-2.6 y modelo Mri-esm2 para el año seco (2027-2028), donde se obtuvo el menor rendimiento de 2,48 t ha⁻¹. No se aprecia reducción en el desarrollo de la cobertura del dosel y a pesar de que el contenido de humedad en el suelo estuvo por debajo de la capacidad de campo en varios momentos del ciclo de cultivo, no se observa disminución del crecimiento foliar, conductancia estomática y senescencia temprana, no presentando estrés hídrico, las precipitaciones de 185,1 mm y los 6 riegos aplicados suplieron las necesidades del cultivo.

TABLA 6. Resultados de la simulación con *AquaCrop* para el escenario SSP1-2.6 y los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, en los periodos seleccionados, para el cultivo del Frijol

Modelo	Año	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rend. (t ha ⁻¹)	WP _{ET} (kg m ⁻³)	ETo (mm)	No. Riegos	Riego (mm)	Prec. (mm)
HadGEM3	Húmedo (2046-2047)	10.0	2.61	1.0	288.6	5	119	359.6
	Medio (2036-2037)	9.74	2.54	0.98	286.8	5	122	308.9
	Seco (2047-2048)	9.96	2.6	1.09	279.2	7	175	250.2
Mpi-esm1	Húmedo (2038-2039)	9.59	2.69	1.13	277.9	6	143	270.7
	Medio (2028-2029)	9.54	2.49	1.03	282.2	5	119	378.6
	Seco (2025-2026)	9.31	2.53	1.05	284.2	6	143	145.9
Mri-esm2	Húmedo (2043-2044)	9.95	2.59	1.05	279.5	6	145	256.2
	Medio (2044-2045)	10	2.6	1.04	261.3	5	122	269.1
	Seco (2027-2028)	9.5	2.48	1.08	266.5	6	146	185.1

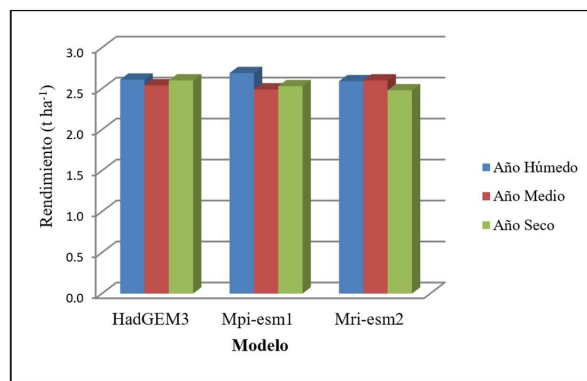


FIGURA 4. Comparación de los modelos HadGEM3, Mpi-esm1 y Mri-esm2, utilizados en la predicción del rendimiento para frijol en los periodos seleccionados.

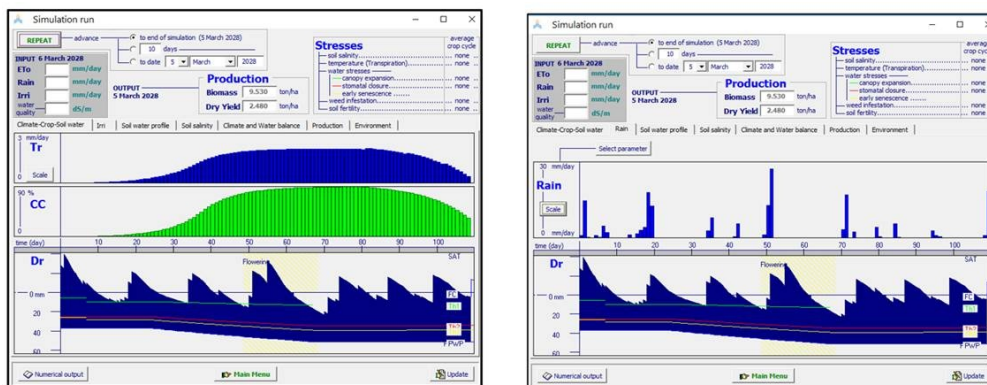


FIGURA 5. Salidas del modelo *Aquacrop* para rendimiento potencial del frijol en el escenario SSP1-2.6 y modelo Mri-esm2 para el año seco (2027-2028).

Resultados muy similares a los encontrados en este trabajo fueron publicados por Ruiz et al. (2018). Estos autores, para analizar el desempeño agronómico del frijol con un ciclo de 128 días en diferentes escenarios climáticos en Colombia, se apoyaron en el modelo *AquaCrop* para simular productividad del agua en base a la lámina bruta e índice de cosecha, encontrando valores entre 0,87-0,98 kg m⁻³ y 35%, respectivamente.

Duarte-Díaz et al. (2021) evaluaron para la zona occidental de Cuba el rendimiento en función de la Etc estimada a futuro y a partir de la reducción de la ETC

para el escenario climático Ecam A2. El valor del rendimiento potencial del frijol para la norma actual (300 mm) es de 2,13 t ha⁻¹ la cual coincide con el rendimiento a obtener con la norma neta total estimada promediada en 445,24 mm para los próximos años hasta 2050.

Mientras que los rendimientos estimados a partir de las reducciones de la ETC, oscilan entre 1,49 y 1,91 t ha⁻¹, encontrándose en el rango propuesto por Doorenbos & Kassam (1986) de 1,5 a 2,0 t ha⁻¹ y además, está muy cercano a los obtenidos en el cultivo para las condiciones de Cuba que es de 1,6 a

2,98 t ha⁻¹ según [González-Robaina et al. \(2013\)](#) para ETc del frijol entre 280 y 380 mm. Los resultados indican que las alternativas pueden ser válidas para la sostenibilidad de la producción agrícola de frijol común. Según estos autores las fases: vegetativa y maduración, son las menos críticas para la reducción del agua para el riego.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran al modelo *AquaCrop* como una alternativa viable para el análisis de la productividad en respuesta al agua disponible y evaluar el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos.

De los tres modelos estudiados el Mpi-esm1 estima los valores más altos de precipitaciones en 26 de los 28 años estudiados, y en 17 años valores por encima de los 1500 mm. Mientras que el modelo HadGEM3 estima 8 años menores a 1000 mm.

Se evidencia la posibilidad de alcanzar en el frijol un rendimiento potencial de 2,6 t ha⁻¹ y una productividad agronómica del agua de 1,13 kg m⁻³, si el cultivo no se somete a ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura, y las precipitaciones son suficiente en este periodo poco lluvioso.

Los valores de rendimiento simulados ponen de manifiesto que el frijol experimenta durante su ciclo biológico condiciones de crecimiento particulares en función del comportamiento de las precipitaciones. Estos valores de producción pueden considerarse como referentes de la capacidad productiva del ambiente de la zona estudiada y pueden resultar de gran utilidad en la programación de riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castillo-Iglesias, Y., González-Robaina, F., Hervis-Granda, G., Riverol-Marrero, L. H., & Cisneros-Zayas, E. (2020). Impacto del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado. *Ingeniería Agrícola*, 10(1), 49-60, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- Cid, G. (1995). *Introducción de métodos y metodologías para la caracterización de las propiedades hidrofísicas así como, las variaciones espacio temporales* (p. 45). [Informe del contrato 004-17]. Instituto de Investigaciones Riego y Drenaje, Ministerio Tecnología Ciencia Medio Ambiente, La Habana, Cuba.
- Cid, G., Bilir, T., González, F., Herrera, J., & Ruiz, M. E. (2011). Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2), 42-46, ISSN: 1010-2760, ISSN electronic: 2071-0054.
- Delgado-Álvarez, A., Martín-Alonso, G. M., & Rivera-Espinosa, R. A. (2022, septiembre). Beneficios de la coinoculación de Hongos Microrrizógenos Arbusculares y rizobios en el cultivo del frijol. *Cultivos Tropicales*, 43(3).
- Doorenbos, J., & Kassam, A. (1986). *Yield response to water, Irrigation and Drainage*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Duarte-Díaz, C. E., Herrera, E. Z., Herrera-Puebla, J., Andrade, F. H., & Chaterlán-Durruthy, Y. (2021). Manejo de las normas netas totales de riego en el frijol ante el cambio climático. *Ingeniería Agrícola*, 11(4), 3-9, ISSN: 2306-1545, ISSN: 2227-8761.
- Escoto-Castillo, A., Sánchez-Peña, L., & Gachuz-Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): Nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669-693, ISSN 0186-7210; e-ISSN 2448-6515, DOI: <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>.
- González-Robaina, F., Delgado-Acosta, R., Díaz-Pérez, Y., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., & Cid-Lazo, G. (2018). Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. *Ingeniería Agrícola*, 8(1), 3-12, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- González-Robaina, F., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., & Cid-Lazo, G. (2013). Funciones agua rendimiento para 14 cultivos agrícolas en condiciones del sur de La Habana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 5-11, ISSN: 1010-2760, ISSN: 2071-0054.
- González-Robaina, F., López-Vargas, D., Cisneros-Zayas, E., Herrera-Puebla, J., & Cid-Lazo, G. (2019). Calibración y análisis de sensibilidad del modelo Aquacrop para frijol en suelo Ferralítico Rojo Compactado. *Ingeniería Agrícola*, 9(4), 3-12, ISSN: 1010-2760, ISSN: 2071-0054.
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy journal*, 101(3), 488-498.
- Hervis-Granda, G., Geler-Roffé, T., Díaz-García, R., Amestoy, I., & Cretaz, E. (2018). WEAP model: Hydrological planning tool for climate change adaptation. *Ingeniería Agrícola*, ISSN: 1010-2760, ISSN: 2071-0054.
- Hoogenboom, G., Jones, J., Wilkens, P., Porter, C., Boote, K., Hunt, L., Singh, U., Lizaso, J., White, J., & Uryasev, O. (2015). *Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) Version 4.6* (<http://dssat.net>). DSSAT Foundation, Prosser.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The

- FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459, ISSN: 0002-1962.
- IPCC, I. E. del I. (2000). Escenarios de Emisiones. *Resumen para responsables de Políticas. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático., Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*
- IPCC, W. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis/resumen para responsables de políticas. *Cambio Climático 2001: Informe de síntesis*, 2-38.
- Januta, A. (2021). *Que significan los cinco futuros del informe de la ONU sobre el clima.* Euronews. es.euronews.com
- López-Casteñ, G., Herrera-Puebla, J., & Castellanos, A. (1998). Agrupamiento de los suelos cubanos en clases hidrológicas para el cálculo del escurrimiento mediante el método de la curva número. *Voluntad Hidráulica*, XIX(4), 22-26.
- Muños Ortega, K. M. (2023). *Modelando para la distribución espacial de Akodon Mollis en Los Andes Ecuatorianos bajo escenarios de Cambio Climático.* Tecnológica Indoamérica.
- OFA y CC. (2023). *Observatorio de Frutos Amazónicos y Cambio climático. Escenarios bajo los modelos SSP y RCP* (pp. 11-19). Observatorio de Frutos Amazónicos y Cambio climático. <https://frutosamazonicos.org.bo>
- Pérez, R., & Álvarez, M. (2005). *Necesidades de Riego de la Caña de Azúcar en Cuba* (Vol. 2). Academia.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (Estudio FAO Riego y Drenaje). FAO, Roma, Italia.
- Ruiz, P., SIFUENTES, I., OJEDA, B., & MACIAS, C. (2018). *Adecuación de fechas de siembra por variabilidad climática en frijol (phaseolus vulgaris) mediante AQUACROP-FAO, en Sinaloa.* IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII Aguascalientes, Aguascalientes, México, Aguascalientes, México.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (Vol. 1028). FAO Rome.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437, ISSN: 0002-1962.
- Tornés-Olivera, N., Brown-Manrique, O., Gómez-Masjuan, Y., & Guerrero-Alega, A. M. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23-30, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- Wani, S., Albrizi, R., & Vajja, N. (2012). Sorghum. En *Crop yield response to water* (Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres E, Raes D, Vol. 66, pp. 144-151). FAO,Rome, Italy.

Ing. Liz Brenda Toledo Pérez, Ing. Hidráulico, Profesor Instructor, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba.

Felicita González-Robaina, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353, e-mail: felicita.gonzalez@iagric.minag.gob.cu.

Enrique Cisneros-Zayas, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353, e-mail: enrique.cisneros@iagric.minag.gob.cu.

Luis Hirán Riverol Marrero, Ing. Hidráulico, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353, e-mail: luis.riverol@iagric.minag.gob.cu.

Carmen Duarte Díaz, Inv. Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Carretera de Fontanar, km 2 1/2, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. Teléf.: (53) (7) 645-1731; 645-1353a, e-mail: carmen.duarte@iagric.minag.gob.cu.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: Conceptualization: L.B. Toledo, F. González, E. Cisneros, C. Duarte. **Data curation:** L.B. Toledo, F. González, E. Cisneros, L.H. Riverol. **Formal analysis:** L.B. Toledo, F. González. **Investigation:** L.B. Toledo, F. González, L.H. Riverol. **Methodology:** F. González, E. Cisneros, L.H. Riverol, C. Duarte. **Software:** F. González, E. Cisneros, L.H. Riverol. **Supervision:** F. González, E. Cisneros, C. Duarte. **Validation:** L.B. Toledo, F. González, E. Cisneros. **Writing-original draft:** L.B. Toledo, F. González. **Writing-review & editing:** L.B. Toledo, F. González, E. Cisneros, C. Duarte.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.