



## RIEGO Y DRENAJE

### ARTÍCULO ORIGINAL

<https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1512>

# Fecha óptima de siembra y productividad de la soya ante escenarios de cambio climático

## *Optimum Sowing Date and Productivity of Soybeans under Climate Change Scenarios*

Dra.C. Felicita González-Robaina<sup>1</sup>, Dr.C. Enrique Cisneros-Zayas, MSc. Guillermo Hervis-Granda,  
Ing. Luis Hirán Riverol-Marrero, Dr.C. Julián Herrera-Puebla, Dr.C. Greco Cid-Lazo  
Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

**RESUMEN.** El cambio climático es un hecho incuestionable, demostrado por evidencias observacionales contundentes como el ascenso de la temperatura media del aire y las alteraciones en el régimen de precipitaciones. *AquaCrop* es un modelo de simulación diseñado para el análisis de la productividad de los cultivos en respuesta al agua disponible y evalúa, entre otros, el impacto del cambio climático en el rendimiento de los mismos. El presente trabajo tiene como objetivo predecir fechas óptimas de siembra y los rendimientos de la soya en suelo Ferralítico Rojo compactado ante escenarios de cambio climático a través de la simulación. Los calendarios de riego se generaron con el Cropwat. En los tres periodos seleccionados del escenario B2 fue necesario aplicar entre 8 y 9 riegos, superando en más de 50 mm la norma total a aplicar para lograr rendimientos superiores a las 3 t·ha<sup>-1</sup>. Si se aplica riego deficitario las reducciones con respecto al potencial se estiman de hasta 40%. No regar en la etapa de floración provoca un decrecimiento en los rendimientos hasta 2,4 t·ha<sup>-1</sup>. Para un año medio se presenta un máximo de rendimiento de 2,9 t·ha<sup>-1</sup> si se siembra entre el 5 y 8 de noviembre. Mientras que para un año húmedo se estiman rendimientos de hasta 2,65 t·ha<sup>-1</sup> si se siembra entre el 15 y el 19 de noviembre. El modelo de simulación *AquaCrop* mostró ser una alternativa viable para reproducir la fenología y productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y variabilidad climática.

**Palabras clave:** Modelo *AquaCrop*, soya, rendimiento, manejo del riego, suelo Ferralítico Rojo.

**ABSTRACT.** Climate change is an unquestionable fact, demonstrated by strong observational evidence such as the rise in average air temperature and alterations in the rainfall regime. *AquaCrop* is a simulation model designed to analyze crop productivity in response to available water and it assesses, among others, the impact of climate change on crop yield. The present work aims to predict optimal sowing dates and soybean yields in compacted Red Ferralitic soil in the face of climate change scenarios through simulation. The irrigation schedules were generated with Cropwat. In the three selected periods of scenario B2 it was necessary to apply between 8 and 9 irrigations, exceeding by more than 50 mm the total norm to be applied to achieve yields greater than 3 t·ha<sup>-1</sup>. If deficit irrigation is applied, the reductions with respect to the potential are estimated of up to 40%. No irrigation in the flowering stage causes a decrease in yields up to 2,4 t·ha<sup>-1</sup>. For an average year, a maximum yield of 2,9 t·ha<sup>-1</sup> is presented if it is sown between November 5 and 8, while for a wet year, yields of up to 2,65 t·ha<sup>-1</sup> are estimated if sown between November 15 and 19. The *AquaCrop* simulation model proved to be a viable alternative to reproduce the phenology and productivity of the crop under different management scenarios and climatic variability.

**Keywords:** AquaCrop Model, Irrigation Management, Ferralitic Red Soil.

## INTRODUCCIÓN

La soya o soja (*Glycine max* (L.) Merrill.) es un importante cultivo oleaginoso y una leguminosa anual rica en proteína, sembrado en aproximadamente 75,5 millones de ha y que produce 176,6 millones de toneladas de grano a nivel mundial,

<sup>1</sup> Autora para correspondencia: Felicita González-Robaina, e-mail: felicita.gonzalez@boyeros.iagric.cu ORCID iD: <https://orcid/0000-0001-8245-4070>

**Recibido:** 04/04/2021.

**Aprobado:** 12/11/2021.

conformando el 80% de este volumen los Estados Unidos, Argentina y Brasil, lo que explica que América sea el continente con mayor producción a nivel mundial con el 85,32%, seguido por Asia que representa el 12,78% (Roján *et al.*, 2019).

A pesar de que en Cuba se conoce la soya desde inicios del siglo XX, su producción no se ha podido estabilizar, se siembran alrededor de 20 000 ha que solo logra satisfacer el 35% de la demanda nacional, lo que obliga al país a importar unas 600 000 toneladas anuales (Garcés *et al.*, 2014).

En los últimos años en Cuba el cultivo de la soya se ha potenciado principalmente por la limitación de alimentos para el consumo humano, para la alimentación animal y porque puede sembrarse en prácticamente durante todo el año (Merino, 2006).

El cambio climático es un hecho incuestionable, demostrado por evidencias observacionales contundentes como el acelerado derretimiento de los glaciares, el ascenso de la temperatura media del aire, las alteraciones en el régimen de precipitaciones y la elevación del nivel medio del mar; tendencias que se reportan a escala global, regional y local (Planos, 2014).

Estos procesos junto con modificaciones en otras variables del ciclo hidrológico se manifiestan de diversa manera e intensidad a escala regional, como consecuencia de los cambios que se producen en el patrón de circulación atmosférica. Según estos autores, el cambio climático también impacta de disímil manera a los ecosistemas, a los recursos naturales, y a los sectores sociales y económicos. Afecta más severamente a los países en desarrollo, particularmente a los pequeños estados insulares, y a aquellos en los que la vulnerabilidad resultante de la intervención humana en el paisaje geográfico es elevada y, por tanto, donde es mayor el riesgo de daños.

El desarrollo y popularización de computadoras proporciona herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos numerosos. Esto permite el desarrollo de sistemas computacionales para analizar el comportamiento y respuesta biológica de los sistemas de producción agrícola en escenarios de manejo diferentes y condiciones climáticas contrastantes (Flores *et al.*, 2013).

Los modelos de simulación de cultivos y el análisis del sistema suelo-planta-atmósfera son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna. Un modelo de cultivo representa de manera sencilla y sintética los procesos fisiológicos y ecológicos del crecimiento y desarrollo de las plantas utilizando ecuaciones matemáticas (Gálvez *et al.*, 2010).

Entre los modelos existentes *AquaCrop* es un modelo de aplicación general de cultivo, se ha utilizado en varias zonas del mundo bajo diferentes condiciones ambientales y está enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial aérea del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible (Steduto *et al.*, 2012). Este modelo fue desarrollado por la FAO y tiene la ventaja de ser relativamente sencillo en comparación con otros modelos de simulación de rendimientos, por lo que

con solo calibrar algunos parámetros se obtienen resultados similares a la realidad. Esto facilita el uso del modelo en tanto que la información necesaria para adaptarlo a las condiciones de nuestro país no es tan grande en comparación a otros modelos y la plataforma del software resulta ser de fácil manejo.

En Cuba el modelo *AquaCrop* (versión 6.0, marzo 2017) fue calibrado y validado para el cultivo de la soya en suelo Ferralítico Rojo en Alquizar, Artemisa por González *et al.* (2019). Como resultados presentan los parámetros fundamentales de suelo y cultivo para su aplicación en las condiciones de estudio, destacándose la duración de las fases fenológicas, el índice de cosecha, los límites de agotamiento de la reserva de agua para definir el estrés hídrico y la curva número para la determinación del escurrimiento superficial.

Una vez realizada la calibración y validación del modelo, este puede ser utilizado para ayudar a interpretar y analizar el comportamiento del cultivo en distintos escenarios de clima (Rebolledo *et al.*, 2018).

El objetivo de este trabajo fue predecir fechas óptimas de siembra y los rendimientos de la soya en suelo Ferralítico Rojo compactado ante escenarios de cambio climático a través de la simulación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo fue calibrado y validado para el cultivo de soya por González *et al.* (2019) con datos provenientes de experimentos de campo realizados durante la época de invierno (enero-abril) en suelo Ferralítico Rojo compactado según Hernández *et al.* (2015), variedad de soya G-7 R-315 con una densidad de población de 370 370 plantas ha<sup>-1</sup>, bajo un sistema de riego por aspersión en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, en Alquizar, coordenadas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' O, altura sobre el nivel medio del mar 6 m, 12 km de la costa.

### Procesamiento y extracción de la información de cambio climático

Para la obtención de estos datos se hizo uso de los valores climáticos del modelo regional PRECIS con una resolución de 25 x 25 km<sup>2</sup>, que según Planos (2014), ha permitido representar el clima futuro en pequeños países. Del PRECIS se tomaron los datos diarios de las variables: temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación del modelo climático Ecam 4 para el escenario B2 de la cuadrícula que representa el clima futuro para el área de estudio (Figura 1) (Instituto de Meteorología-Cuba, 2012).

Teniendo en cuenta los criterios de Planos *et al.* (2012) para Cuba, se seleccionó el escenario B2 que considera un mundo con una población creciente, pero a tasas más lentas que en los otros escenarios, con niveles de desarrollo económico intermedios, y un cambio tecnológico lento pero variado, la sociedad está orientada hacia la protección ambiental y la equidad social, y prioriza el ámbito local y regional.

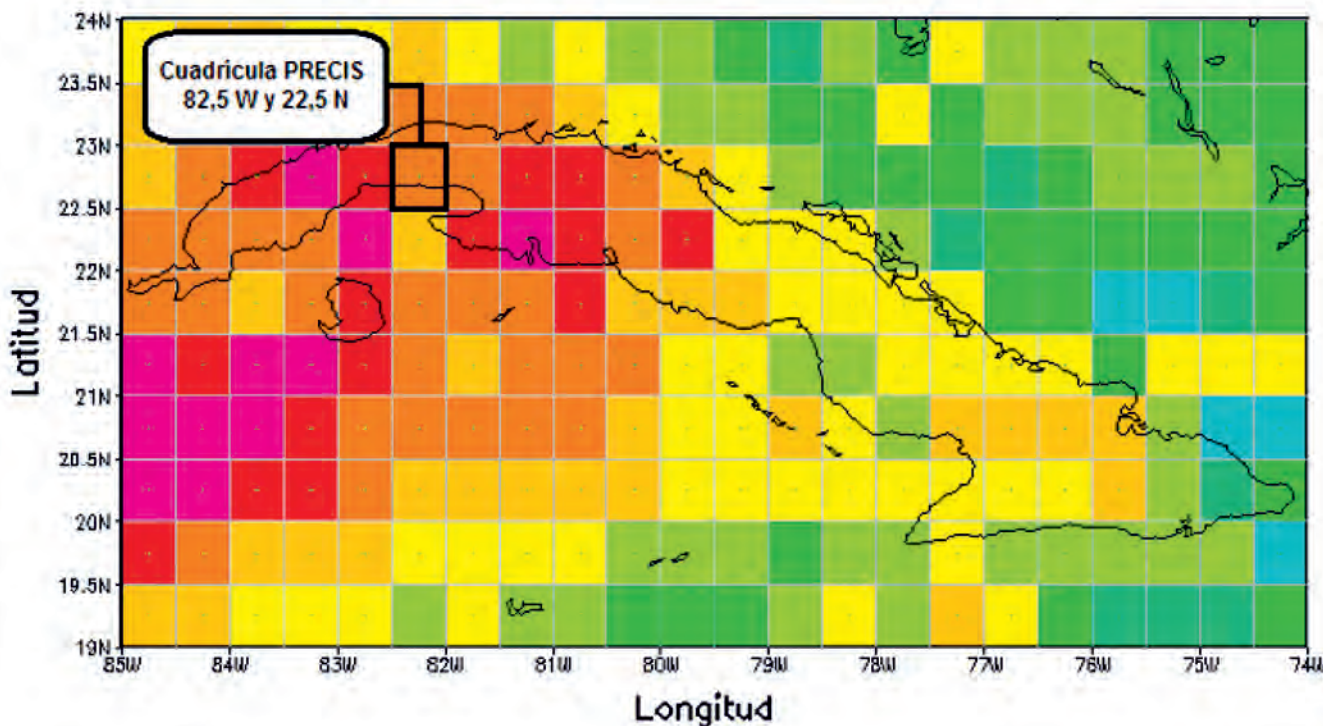


FIGURA 1. Cuadrícula del modelo PRECIS que contiene la información de las variables climáticas para el escenario B2 evaluado en el área de estudio.

### Procesamiento de las precipitaciones

La metodología para el procesamiento de los datos diarios de lluvia, indispensable en la programación del suministro de agua y el manejo de la misma, fue tomada de Steduto *et al.* (2012) y es apoyada por las indicaciones de la norma cubana (NC 48-35, 1984). Las precipitaciones para el período 2020-2050 del escenario B2, se procesaron y se evaluaron para definir las características de los períodos climáticos según la probabilidad de ocurrencia en el período (húmedo, medio y seco) sobre 25, 50 y 75%. Como el cultivo analizado se desarrolla en el período de noviembre-abril, el análisis se centró en este período.

### Suministro y manejo del riego. Modelo Cropwat

Se utilizó el programa Cropwat (versión 8.0) para estimar las necesidades hídricas del cultivo de soja y el manejo del riego para cada período climático considerando las variables climáticas del escenario B2. 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. En la Tabla 1 se resumen los parámetros de entrada para determinar las necesidades hídricas del cultivo de soja.

**TABLA 1. Parámetros de entrada para determinar las necesidades hídricas del cultivo de soja para las condiciones del área de estudio**

Módulo	Variable	UM	Valor
Evapotranspiración	Temperatura máxima y mínima	°C	Según período
	Humedad relativa	%	
	Velocidad del viento	m/s	
	Insolación	horas/luz	
Suelo	Agua Disponible Total (ADT)	mm/m	130
	Tasa máxima de infiltración	mm/días	50
	Profundidad radicular máxima	cm	40
	Agotamiento Inicial de la humedad del suelo	mm/m	65
Cultivo	Fecha de siembra	-	06-ene
	Coeficiente de cultivo (kc)	-	Inicial: 0,50
		-	Medio: 1,15
			Final: 0,50

Módulo	Variable	UM	Valor
Cultivo	Duración de las fases	días	Inicial: 15 Desarrollo: 30 Medio: 50 Final: 17
	Desarrollo de las raíces	m	Inicial: 0,30 Medio: 0,60
	Fracción de agotamiento crítico (p)	%	Inicial, medio y final: 0,5
	Factor de respuesta del rendimiento (Ky)	-	Inicial: 0,2 Desarrollo: 0,8 Medio: 1 Final: 0,85 Total: 0,85
	Máxima Altura del cultivo	m	0,40

Fuente: Suelo Cid *et al.* (2012), Cultivo Allen (2006).

La evapotranspiración de referencia fue estimada a partir de datos de temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa y la velocidad del viento, disponibles en cada escenario y período climático analizado. En el software se usa la metodología propuesta por Allen (2006), cuando existen limitaciones de datos para la aplicación del método, esta utiliza la radiación global de onda corta a partir de la diferencia de la temperatura máxima y mínima ( $T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$ ) y valores medios de velocidad del viento a una altura de 2 metros, para esto se debe introducir la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas (coordenadas Norte y Oeste) y altitud sobre el nivel medio del mar.

La precipitación efectiva fue estimada a partir del módulo de precipitación, considerando los datos diarios de lluvia extraídos de PRECIS para los escenarios y períodos climáticos, el método empleado fue el USDA (Soil Conservation Service), debido a que este es el más recomendado por la FAO y ha sido validado para las condiciones del área de estudio por Elizastigue (2018).

La precipitación efectiva fue estimada a partir del módulo de precipitación, considerando los datos diarios de lluvia extraídos de PRECIS para los escenarios y períodos climáticos, el método empleado fue el USDA (Soil Conservation Service), debido a que este es el más recomendado por la FAO y ha sido validado para las condiciones del área de estudio por Elizastigue (2018).

### Modelo AquaCrop

Una descripción minuciosa de las principales características de *AquaCrop* aparece en el Boletín de la FAO: Riego y Drenaje N° 66 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.

Los parámetros más importantes que resultaron de la calibración y validación en Cuba de este modelo para la soya en suelo Ferralítico Rojo compactado aparecen en el trabajo

de González *et al.* (2019), y servirán de entrada a todas las simulaciones que se realizarán en este estudio. Se consideró solamente la fertilidad química del suelo para el crecimiento del cultivo. *AquaCrop* proporciona ajustes predeterminados de los parámetros esenciales del cultivo para varias categorías limitantes de fertilidad, que van desde casi óptima hasta baja.

### Aplicaciones

Se simuló la producción ajustada para el escenario B2 en los tres períodos seleccionados de 2020-2050 (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.

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 de cada escenario seleccionado. La programación del riego se hizo de manera automática con un nivel de agotamiento permisible del 50% en el suelo por el modelo CROPWAT. También se simuló riego deficitario con el objetivo de estimar los rendimientos futuros.

Como parte de los resultados se realizó una estimación de la fecha más apropiada para la siembra de soya en la zona de estudio para año húmedo y medio del escenario B2, con el fin de evaluar el efecto del cambio climático.

El indicador de estrés es el agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular (Dr), expresados como fracciones (p) del agua disponible total en el suelo (Rosadi *et al.*, 2007). El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico:

- 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal.
- 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal.
- 3) cierre estomático.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del clima futuro para los escenarios climáticos B2

En la Figura 2 se presenta el comportamiento de la precipitación media mensual para el período base (1971-2000) y el período futuro a mediano plazo (2020-2050) bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero B2. Puede observarse que el comportamiento medio en este período es al aumento de las precipitaciones en los meses de mayo-junio, septiembre y octubre; en resto de los meses la tendencia es a la disminución.

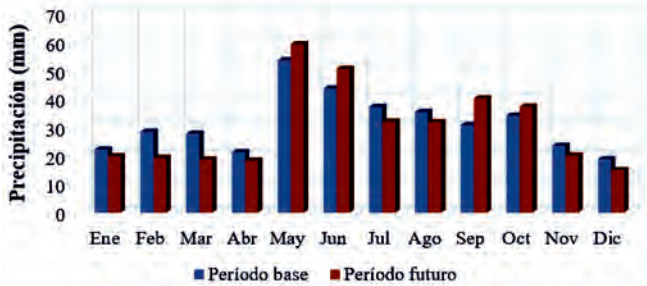


FIGURA 2. Precipitación media mensual para el período base y período futuro (mediano plazo), considerando el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero B2.

Las disminuciones en las precipitaciones medias mensuales para el período analizado pueden ser observadas en forma de anomalía porcentual (diferencia porcentual entre el período futuro respecto al base) en la Figura 3. Nótese que, las mayores afectaciones proyectadas para la precipitación en este escenario se producen en los meses de febrero y marzo, con una disminución de la lluvia en valores superiores al 30%, para el resto de los meses con anomalías negativas el valor de reducción oscila entre 9 y 20%.

La mayor anomalía positiva se produce en el mes de septiembre con un valor de 30%, mientras que en el resto de los meses oscila entre 9 y 15%. En los meses de julio y agosto las reducciones se proyectan entre -12 y -7%, respectivamente. En las anomalías es evidente un cambio brusco del valor y signo de la anomalía en los cambios de períodos hidrológicos, abril-mayo (transición al período lluvioso) y octubre-noviembre (transición al período seco). En sentido general las proyecciones en la variable no indican una tendencia clara para el período húmedo del año y se evidencia una tendencia a períodos secos más críticos, coincidiendo con los Informes de Cambio Climático que explican que para América Central aumentarían la frecuencia de estaciones extremadamente secas (Bates *et al.*, 2008).

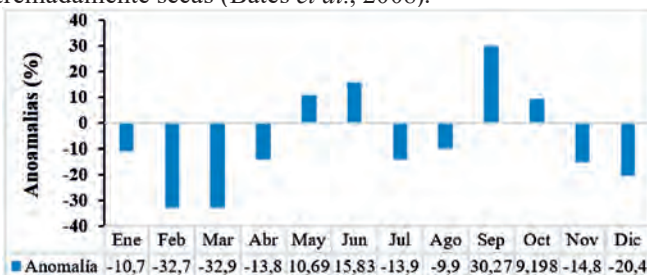


FIGURA 3. Anomalías en la precipitación mensual para el escenario SRES B2.

En la Figura 4 se presenta las anomalías en las temperaturas máximas y mínimas proyectadas para el escenario B2, resultado del modelo Echam en el período 2020-2050. Puede observarse que la anomalía en la temperatura mínima es superior a los proyectados para la temperatura máxima, de acuerdo con los resultados se proyecta que para finales de siglo la temperatura máxima anual aumente como promedio 1°C, mientras que para la temperatura mínima anual se proyecta que aumente 1,19 °C como promedio.

La mayor anomalía positiva se produce en el mes de septiembre con un valor de 30%, mientras que en el resto de los meses oscila entre 9 y 15%. En los meses de julio y agosto las reducciones se proyectan entre -12 y -7%, respectivamente. En las anomalías es evidente un cambio brusco del valor y signo de la anomalía en los cambios de períodos hidrológicos, abril-mayo (transición al período lluvioso) y octubre-noviembre (transición al período seco). En sentido general las proyecciones en la variable no indican una tendencia clara para el período húmedo del año y se evidencia una tendencia a períodos secos más críticos, coincidiendo con los Informes de Cambio Climático que explican que para América Central aumentarían la frecuencia de estaciones extremadamente secas (Bates *et al.*, 2008).

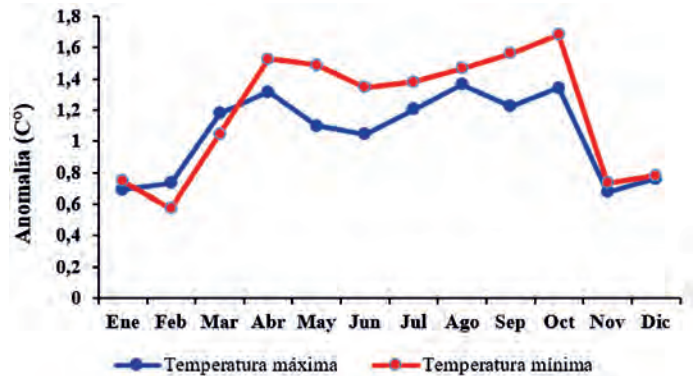


FIGURA 4. Anomalías en la temperatura máxima y mínima para el escenario SRES B2.

En el escenario B2 a partir de los datos diarios de precipitación media ponderada en el período de 2020 a 2050, de coordenadas Latitud 22° 5'N, Longitud 82° 5'W y con una altitud de 11,3 m, fueron seleccionados los períodos secos de cada año que coincidían a su vez, con el período de siembra del cultivo (noviembre-abril). Dichos datos de precipitación fueron sumados para obtener la lluvia acumulada total en cada uno de estos períodos, calculando así la distribución de mejor ajuste para una probabilidad de un 25, 50 y 75% con el objetivo de obtener los períodos húmedos, medio y seco, respectivamente. A partir de los resultados se selecciona el año semejante para cada una de estas probabilidades, resultando el período húmedo 2047-2048, período medio 2021-2022 y período seco 2022-2023.

En la Figura 5 se presenta el comportamiento de las variables temperatura, precipitación y ET<sub>0</sub> para los períodos 2047-2048, 2021-2022, 2022-2023 bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero B2.

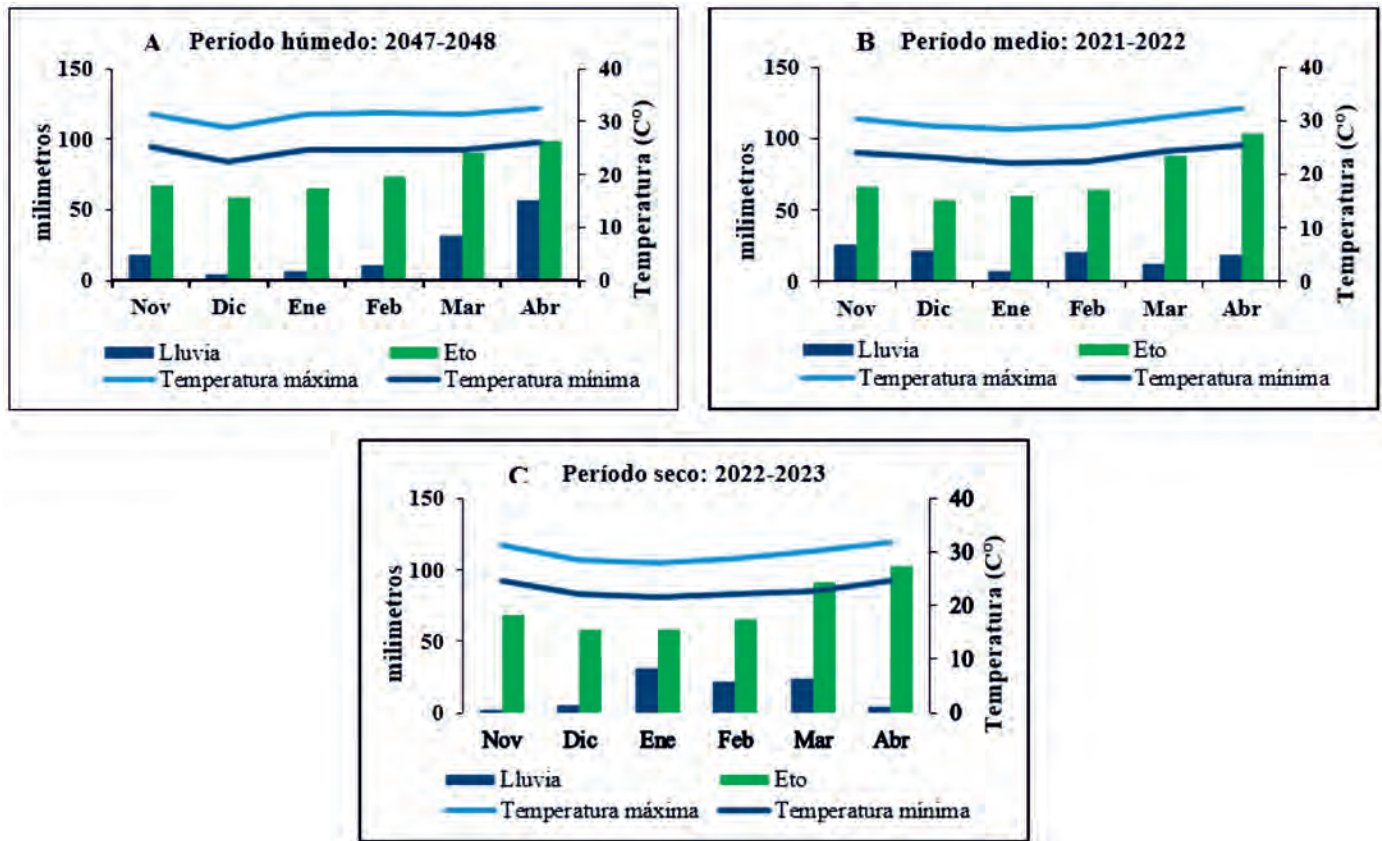


FIGURA 5. Comportamiento de las variables climatológicas para los períodos 2047-2048, 2021-2022, 2022-2023.

En la Figura 5A se presenta el comportamiento de las variables de temperatura, precipitación y  $ET_0$ , para el período húmedo (2047-2048), en este caso el comportamiento de la temperatura varía desde los 22,5 °C en el mes de diciembre hasta los 32,6 °C en el mes de abril. El acumulado de la lluvia para este período es de 126,8 mm, la precipitación más baja de este período se produce en el mes de diciembre también, con un valor de 4,1 mm coincidiendo con la fase inicial del cultivo. En el caso de la evapotranspiración de referencia se encuentra en un rango 58,9 mm en el mes de diciembre hasta 98,4 mm en el mes de abril.

Por otra parte, en la Figura 5B se presenta el comportamiento de las variables de temperatura, precipitación y  $ET_0$ , para el período medio (2021-2022), en este caso el comportamiento de la temperatura varía desde los 22 °C en el mes de enero hasta los 32,4 °C en el mes de abril, observándose de manera general un comportamiento similar de las temperaturas respecto al período húmedo. El acumulado de la lluvia para este período es de 105,4 mm, siendo un 83% de la lluvia acumulada del período húmedo, la precipitación más baja de este período se produce en el mes de enero, con un valor de 7,1 mm coincidiendo con la fase inicial del cultivo. En el caso de la evapotranspiración de referencia se encuentra en un rango 57 mm en el mes de diciembre hasta 103,2 mm en el mes de abril.

En el período seco (2022-2023) (véase la Figura 5C) se presenta el comportamiento de las variables de temperatura, precipitación y  $ET_0$ , donde el comportamiento de la temperatura varía desde los 21,6 °C en el mes de enero hasta los 31,9 °C en

el mes de abril. El acumulado de la lluvia para este período es de 88,3 mm, siendo un 70% de la lluvia acumulada del período húmedo, la precipitación más baja de este período se produce en el mes de noviembre, con un valor de 2,6 mm, en este mes no ocurre afectación directa al cultivo porque este no está activo aun, sin embargo, esto puede generar un déficit al inicio de la siembra por los bajos acumulados en el período antecedente. En el caso de la evapotranspiración de referencia se encuentra en un rango 57 mm en el mes de diciembre hasta 101,7 mm en el mes de abril, siendo a la vez el valor más alto de los tres períodos analizados.

Los resultados obtenidos coinciden con lo publicado por Goyal (2004), donde expone que según las predicciones de los modelos de cambio climático, se espera que la  $ET_0$  aumente en los próximos años ocasionado por un aumento de la temperatura. Además, en cuanto a los cambios en la  $ET_0$  apoyan lo expresado por Pereira *et al.* (2012) sobre su aumento debido al cambio climático, especialmente en invierno y primavera cuando el aumento de la temperatura podría ser mayor.

### Necesidades hídricas del cultivo de soya y el manejo del riego

Las necesidades hídricas y el manejo del riego en el cultivo de soya, obtenidos con el software CROPWAT para los distintos períodos climáticos analizados, son presentados en la Tabla 2, donde aparecen los días de riego y las láminas a aplicar para cada caso.

**TABLA 2. Días y láminas a aplicar para cada período en el escenario B2**

Húmedo		Medio		Seco	
Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)	Días	Lámina riego (mm)
1	20,7	1	20,6	26	24,2
23	23,2	26	23,9	39	26,4
39	26,1	40	26,4	56	28,6
50	27,2	50	26,4	67	27
65	26,6	62	26,1	78	27,9
74	28,5	72	29,2	86	29,2
84	26,5	80	26,6	94	27
93	27,7	90	27,4	103	28,2
		99	27,7		
<b>Norma total (mm)</b>					
206,5		234,4		218,4	
No. riegos 8		9		8	

Se observan los resultados del número de riegos para el escenario B2, estos varían entre 8 y 9 riegos, con normas totales que oscilante entre 206,5 y 234,4 mm, sin que se produzca variación notable entre las láminas a aplicar en cada riego.

En los primeros riegos las normas fueron inferiores a 24 mm, mientras que en el resto variaron entre 26 y 29 mm, en los tres periodos las normas sobrepasaron las aplicadas en los experimentos de campo que sirvieron de fuente para la calibración y validación del modelo para suelo Ferralítico Rojo compactado. En el caso del período húmedo el último riego se aplica a los 93 días de la siembra, prolongándose el riego para el período medio y seco hasta los 103 días de la siembra.

### Aplicaciones

#### Escenario B2 para año seco, medio y húmedo

En la Tabla 3 se compara la producción potencial de soja en los tres años del escenario B2, según la probabilidad de ocurrencia en el período (húmedo, medio y seco) sobre 25, 50 y 75%.

En los tres años seleccionados del escenario B2 la norma total a aplicar para lograr rendimientos superiores a las 3 t ha<sup>-1</sup> fue superior en más de 50 mm. Los valores diarios de transpiración no superan los 3 mm día<sup>-1</sup>, lo que corrobora lo planteado en el epígrafe anterior de caracterización climática sobre el aumento de las temperaturas para estos años, así como la influencia de esta variable sobre la disminución de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración.

**TABLA 3. Comparación de las salidas del modelo para la simulación del rendimiento potencial de soja en los tres años seleccionados del escenario B2**

Variable	Escenario B2		
	Año húmedo (2048)	Año medio (2022)	Año seco (2023)
Biomasa (t ha <sup>-1</sup> )	9,13	8,11	7,4
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	3,1	2,87	2,55

Variable	Escenario B2		
	Año húmedo (2048)	Año medio (2022)	Año seco (2023)
WP <sub>ET</sub> (kg m <sup>-3</sup> )	1,07	1,05	0,91
Precipitación (mm)	104,4	42,9	80,8
Riego (mm)	206,5	234,4	218,4
No. Riegos	8	9	8
Evaporación (mm)	78,8	81	94,3
Transpiración (mm)	207,2	196,1	187,1
Evapotranspiración (mm)	305,7	292,4	295,5

Si comparamos el rendimiento en el año seco (tabla 3) con el obtenido en el potencial para condiciones similares (2,68 t ha<sup>-1</sup>) por González *et al.* (2019), se observa un decrecimiento de este en un 5%, mientras que la productividad del agua es superior (23%) por la menor cantidad de riegos aplicados.

Las máximas producciones se obtienen cuando el cultivo puede transpirar a su máxima tasa, es decir, cuando no se produce cierre de estomas y por lo tanto reducción en la transpiración simultáneamente con la asimilación de CO<sub>2</sub>. Las tasas de estos últimos dos procesos están fuertemente ligadas y por tanto el cálculo de la transpiración por el dosel del cultivo es una ruta directa para el cálculo de la asimilación del cultivo (Allen, 2006; Allen *et al.*, 2006).

Rendimientos de 5,3, 3,1 y 1,9 t ha<sup>-1</sup> en la soja fueron simulados para año húmedo, medio y seco, respectivamente, con el modelo *AquaCrop* por Morla y Giayetto (2012) en Argentina. Considerando estos valores potenciales de producción como referentes de la capacidad productiva de los ambientes de esta región.

En la Figura 6 se presenta la salida del modelo *AquaCrop* para producción potencial en el cultivo de soja en el año seco del escenario B2. Se aprecia reducción en el desarrollo de la cobertura del dosel entre los 20 y 45 días de plantada la soja, provocando un estrés promedio del



24% en el crecimiento foliar debido al agotamiento de la humedad del suelo en la zona radicular en ese periodo, y una disminución del rendimiento.

Los valores de rendimiento y productividad del agua están en el intervalo publicado en trabajos prece-

denes de González *et al.* (2015). En el caso particular del rendimiento en experimentos de campo varió entre 0,42 – 3,1 t ha<sup>-1</sup>, mientras que la productividad en base al rendimiento fue superior en todos los años al promedio obtenido por estos autores (0,67 kg m<sup>-3</sup>).

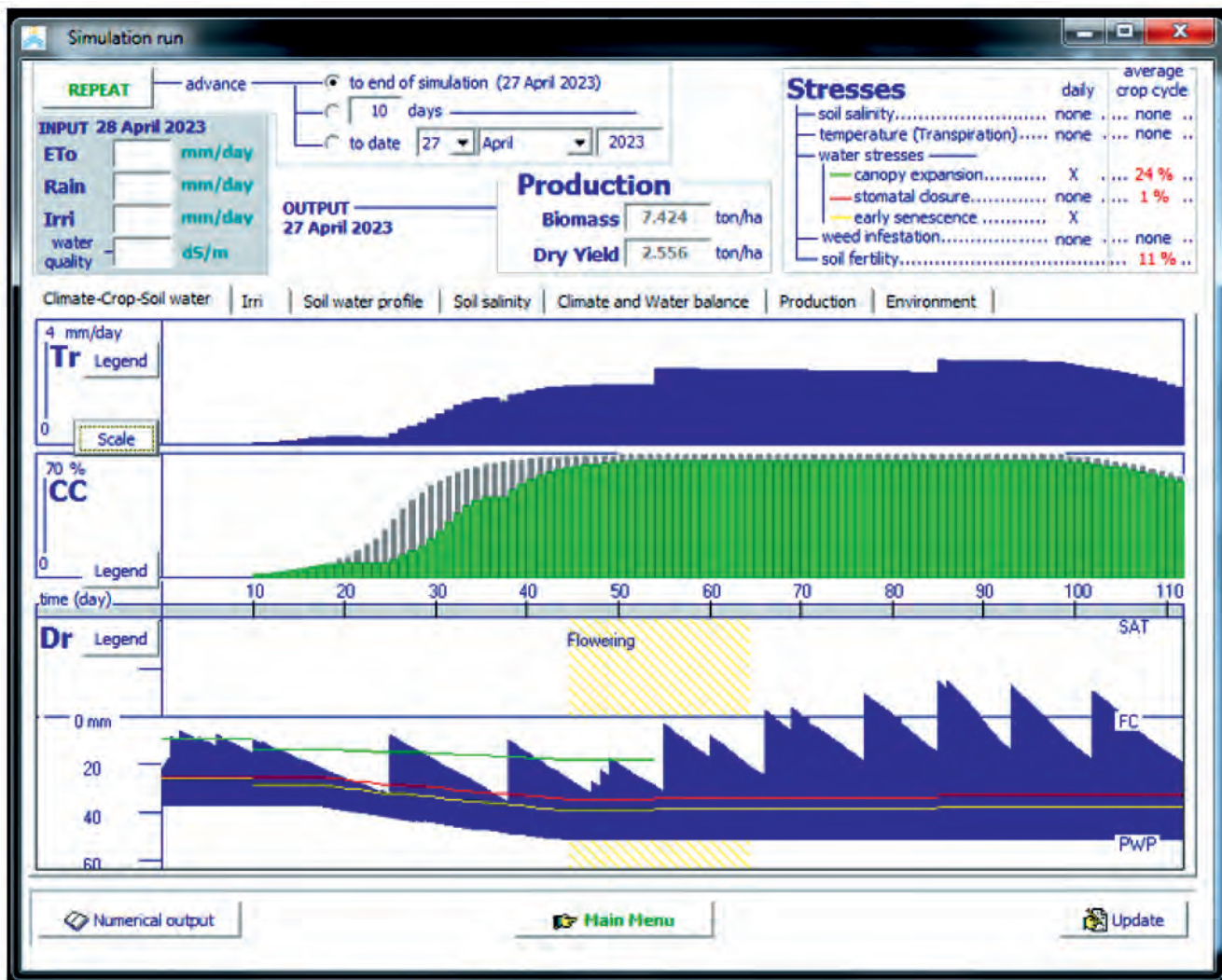


FIGURA 6. Salidas del modelo para producción potencial de soja en año seco del escenario B2.

Confalone *et al.* (2017) determinaron el efecto que produce el cambio climático en el rendimiento de los cultivos de soja y maíz en Argentina, en su estudio para obtener rendimientos potenciales utilizaron los modelos de cultivos del DSSAT, previamente calibrados, en las condiciones locales y las proyecciones del modelo climático regional PRECIS para las décadas 2020-29 y 2050-59. Las proyecciones climáticas indicaron aumento en los rendimientos en cultivos de secano. En soja el aumento es de 25 y 28%, para las décadas 2020-29 y 2050-59, respectivamente. Sin embargo, al considerar la variabilidad térmica impuesta por la ola de calor, se evidenció que la soja experimentó reducción en el rendimiento del 19% cuando se cultivan sin riego durante esos eventos extremos. Cuando se comparan los rendimientos de cultivos irrigados en un año considerado típico, con respecto al año en que tuvo lugar la ola de calor, se observó que el aumento de temperatura perjudica a la soja, que rindió 13% menos.

### Riego deficitario controlado

Si se aplica riego deficitario (6 riegos, eliminando 2 riegos en la maduración) en el año húmedo y bajo el escenario B2, los rendimientos se estiman en 2,87 t ha<sup>-1</sup> y la biomasa 8,28 t ha<sup>-1</sup>, lográndose una productividad de 1,04 kg m<sup>-3</sup>, con reducciones con respecto al potencial hasta de un 8% (Tabla 4). Este manejo del riego, unido a las escasas y mal distribuidas precipitaciones provocó agotamiento del agua en el suelo en casi todo el período de desarrollo del cultivo y marcados niveles de estrés. Después de los 90 días de plantada la soja sufrió estrés que ocasionó un 55% del cierre estomático y 10% de aceleración de la senescencia del dosel vegetal.



**TABLA 4. Comparación de las salidas del modelo para la simulación del rendimiento de soja con riego deficitario en el año húmedo del escenario B2.**

Variable	Escenario B2- Año húmedo		
	6 riegos	5 riegos	4 riegos
Biomasa (t ha <sup>-1</sup> )	8,28	6,9	5,9
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	2,87	2,29	1,87
WP <sub>ET</sub> (kg m <sup>-3</sup> )	1,04	0,9	0,83
Precipitación (mm)	104,4	104,4	104,4
Riego (mm)	152	126	98
Evaporación (mm)	91,3	98,1	102
Transpiración (mm)	186,2	155,7	124,3
Evapotranspiración (mm)	305,7	305,7	305,7

En general, las reducciones en rendimiento podrían ser con riego deficitario de hasta el 40% con respecto al potencial en el año húmedo, por su parte la productividad decrece en un 22% como consecuencia de la reducción de la norma de riego de 54 hasta 108 mm.

Mientras que, si se reducen los riegos a 6, pero los dos riegos se eliminan en la etapa de floración, los rendimientos decrecen hasta las 2,49 t ha<sup>-1</sup> y la productividad del agua a 0,96 kg m<sup>-3</sup>. Se observa a los 50 días estrés del 100% inhibición de la expansión del dosel vegetal y entre los 60-70 días de plantada 68% cierre estomático y 21% aceleración de la senescencia como respuesta al estrés hídrico (Figura 7). Como consecuencia del agotamiento de la humedad del suelo en la zona radicular en casi todo el periodo se redujo la transpiración de 3 a 0,8 mm día<sup>-1</sup>. Aunque las lluvias fueron escasas en este periodo, los 24 mm caídos en 5 días consecutivos ayudaron a la recuperación del cultivo.

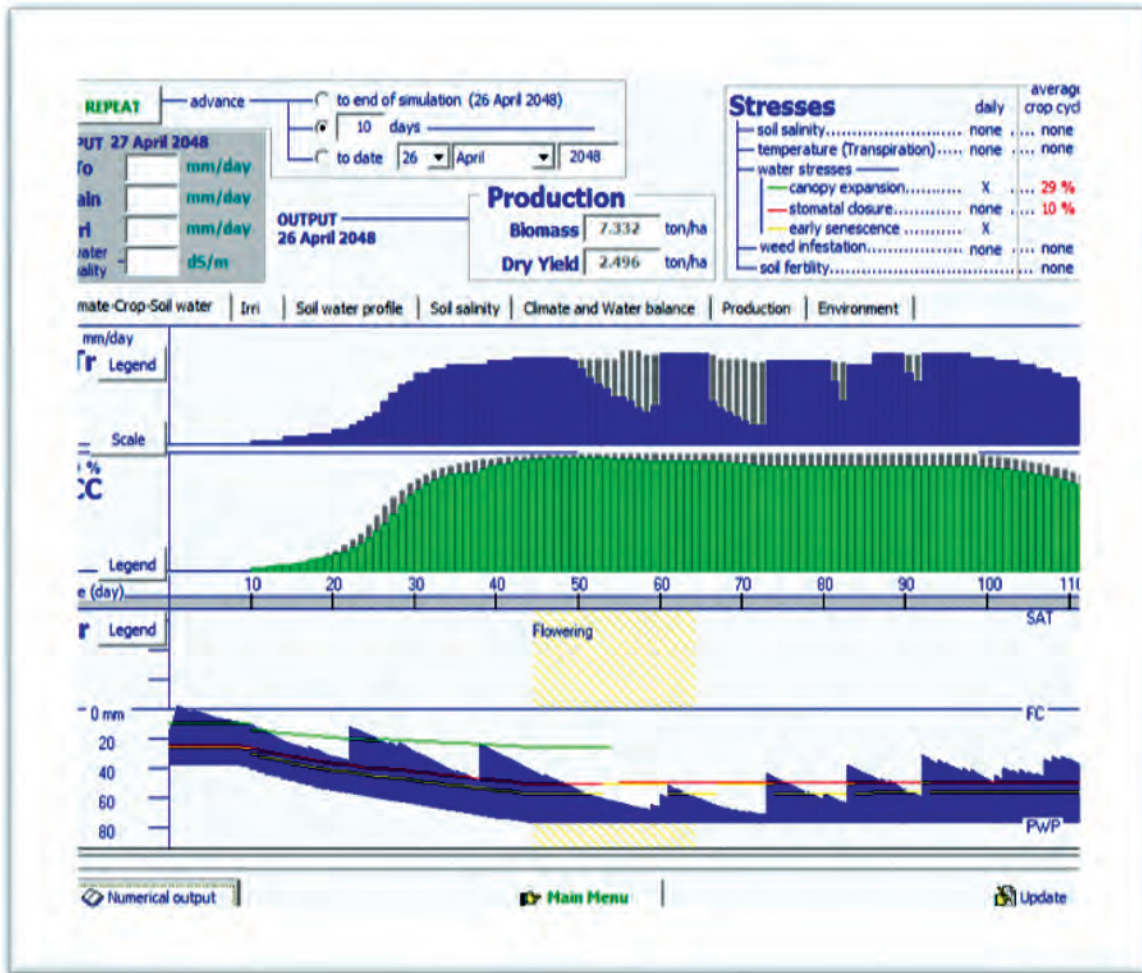


FIGURA 7. Simulación para riego deficitario en el año húmedo bajo el escenario B2.

La habilidad del modelo *AquaCrop* para describir el efecto del estrés hídrico ocurrido en momentos particulares del ciclo de los cultivos, hacen que se posicione como una herramienta de gran utilidad para su uso en la determinación de prácticas de manejo como puede ser el desarrollo de estrategias de riego.

### Fechas de siembra

Para tratar de establecer un rango de fechas óptimas de acuerdo a los supuestos, se utilizó el modelo para que simulara el desarrollo del cultivo y predecir su rendimiento. Para ello se utilizó un escenario lluvioso y uno medio. Los resultados se presentan en la Figura 8. Se muestran 62 corridas del modelo con los rendimientos que se obtendrían modificando la fecha de siembra diariamente.

Los rendimientos mostrados en la Figura 8, involucran la respuesta del cultivo a la cantidad de precipitación por fase fenológica. Puede observarse que para el año medio se presenta un máximo de rendimiento a principios del mes de noviembre, específicamente del 5 al 8. Bajo las condiciones de este estu-

dio (condiciones climatológicas de un año categorizado como medio), sembrando en este período, en promedio se obtendrían rendimientos cercanos a las 2,9 t ha<sup>-1</sup>. Otro período de importancia se observa en los 5 primeros días de diciembre donde se pueden alcanzar rendimientos por encima de 2,6 t ha<sup>-1</sup>.

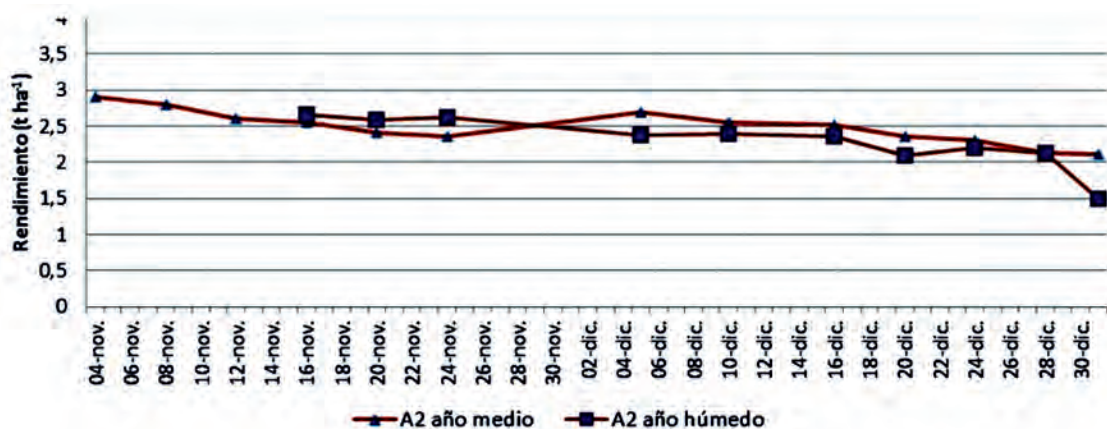


FIGURA 8. Rendimiento de soya bajo un escenario B2 para año húmedo y medio con base en diferentes fechas de siembra.

Mientras que para el año húmedo seleccionado se estiman rendimientos de hasta 2,65 t ha<sup>-1</sup> si se siembra entre el 15 y el 19 de noviembre; fechas de siembra en las que los rendimientos para el año medio decrecen en un 10% con relación al húmedo.

En estudios realizados por Morla y Giayetto (2012) y Denka (2014) concluyen que una adecuada fecha de siembra garantiza un entorno agroclimático favorable para un crecimiento y desarrollo óptimo del cultivo y por tanto, mejores rendimientos.

Roján *et al.* (2019) evaluaron la variabilidad del rendimiento en cultivares de soya en la época de frío en un suelo Hidromórfico Gley Nodular Ferruginoso Petroférico en Los Palacios, Pinar del Río. Los resultados mostraron que los mayores valores de rendimiento agrícola (2,31 t ha<sup>-1</sup>) se corresponden con los valores más altos de temperatura y radiación solar en el mes de diciembre 2012.

El trabajo evidencia que se deben utilizar diferentes fechas de siembra según la distribución mensual de la precipitación, para lo cual se requiere de un análisis anual que permita la clasificación del año bajo escenarios específicos, por lo tanto, el uso de fechas de siembra tradicionales sin considerar la variabilidad climática regional, es un procedimiento de alto riesgo.

## CONCLUSIONES

- El modelo de simulación *AquaCrop* mostró ser una alternativa viable para reproducir la fenología y productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y variabilidad climática.
- La tendencia de las precipitaciones en el escenario B2 se caracteriza por el aumento en los meses de abril-junio, septiembre y octubre; en el resto de los meses a la disminución.
- En los tres años seleccionados del escenario B2 fue necesario aplicar entre 8 y 9 riegos, superando en más de 50 mm la norma total a aplicar para lograr rendimientos cercanos a las 3 t ha<sup>-1</sup>.
- Con riego deficitario las reducciones en rendimiento podrían ser de hasta el 40% con respecto al potencial, mientras que la productividad decrece en un 22% como consecuencia de la reducción de la norma de riego.
- Para el año medio se presenta un máximo de rendimiento de 2,9 t ha<sup>-1</sup> si se siembra entre el 5 y 8 de noviembre. Mientras que para el año húmedo se estiman rendimientos de hasta 2,65 t ha<sup>-1</sup> si se siembra entre el 15 y el 19 de noviembre.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.: *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Ed. Food & Agriculture Org., vol. 56, Roma. Italia, 300 p., 2006, ISBN: 92-5-304219-2.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M.: "Evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements", *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56: 300, 2006, ISSN: 0254-5293.
- BATES, B.; KUNDZEWICZ, Z.; WU, S.; PALUTIKOF, J.: *El cambio climático y el agua*, no. 9291693235, Inst. PNUMA, Ginebra (Suiza) Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 224 p., 2008.
- CID, G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, M.E.: "Características físicas que definen el comportamiento hidráulico de algunos suelos de Cuba", *Revista Ingeniería Agrícola*, 2(2): 25-31, 2012, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2277-8761.
- CONFALONE, A.E.; VILATTE, C.; AGUAS, L.; BARUFALDI, M.S.; ESEIZA, M.; PONCE, G.D.: "Efecto biofísico del cambio climático en el rendimiento de cultivos de verano", *Cuban Journal of Agricultural Science*, 51(2): 249-259, 2017, ISSN: ISSN 0864-0408, e-ISSN: 2079-3480.
- DENKA, K.L.: "Simulations of the potential yields of Jenguma Soybean variety in the upper west region using AquaCrop Model", *International Journal of Scientific & Technology Research*, 3(5): 101-106, 2014, ISSN: 2277-8616.
- ELIZASTIGUE, S.Y.: *Evaluación de la lluvia efectiva con diferentes métodos empíricos*, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE),

- Eng. Thesis, La Habana, Cuba, 71 p., 2018.
- FLORES, G.H.; OJEDA, B.W.; FLORES, M.H.; SIFUENTES, I.E.; MEJÍA, S.E.: "Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop", *Agrociencia*, 47(4): 347-359, 2013, ISSN: 1405-3195.
- GÁLVEZ, G.; SIGARROA, A.; LÓPEZ, T.; FERNÁNDEZ, J.: "Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos", *Cultivos Tropicales*, 31(3): 60-65, 2010, ISSN: 1819-4087.
- GARCÉS, F.R.; AMPUÑO, M.S.A.; VÁSQUEZ, M.G.H.: "Agronomía, producción y calidad de grano de variedades de soya durante dos épocas de cultivo", *Bioscience Journal*, 30(5): 717-729, Uberlandia, 2014, ISSN: 1516-3725, e-ISSN: 1981-3163.
- GONZÁLEZ, R.F.; CISNEROS, Z.E.; HERRERA, P.J.; LÓPEZ, T.; CID, L.G.: "Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico", *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1): 3-13, 2019, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.
- GONZÁLEZ, R.F.; LÓPEZ, S.T.; HERRERA, P.J.: "Indicadores de productividad del agua por cultivos y técnicas de riego en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(4): 57-63, 2015, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- GOYAL, R.: "Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India)", *Agricultural Water Management*, 69(1): 1-11, 2004, ISSN: 0378-3774.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, J.J.M.; MESA, N.Á.; BOSCH, I.D.; RIVERO, L.; CAMACHO, E.: *Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba.*, Ed. AGRINFOR, Barcaz L L ed., vol. I, La Habana, Cuba, 64 p., Ministerio de la Agricultura de Cuba, 2015, ISBN: 959-246-022-1.
- INSTITUTO DE METEOROLOGÍA-CUBA: *Proyección futura de índices agroclimáticos de interés agrícola para Cuba*, Inst. Instituto de Meteorología, Informe de Resultado del Proyecto 4084 Segunda Comunicación de Cuba a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, La Habana, Cuba, 103 p., 2012.
- MERINO, J.D.: *Caracterización morfofisiológica y agronómica de cultivares de soya en siembra de invierno en suelo pardo con carbonato*, Universidad Central de las Villas (UCLV), Facultad de Ciencias Agropecuarias, Tesis de grado presentada en opción al título de ingeniero agrónomo, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 65 p., 2006.
- MORLA, F.; GIAYETTO, O.: "Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba", En: *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, Argentina, Argentina, 2012.
- NC 48-35: *Determinación de la lluvia máxima diaria.*, Inst. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba, 30 p., Vig de 1984.
- PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I.: "Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving", *Agricultural water management*, 108: 39-51, 2012, ISSN: 0378-3774.
- PLANOS, G.E.; RIVERO, R.; GUEVARA, V.: *Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba*, Inst. Agencia de Medio Ambiente (AMA), La Habana, Cuba, Havana: Environmental Agency (CU), 2012.
- PLANOS, G.E.O.: *Síntesis informativa sobre impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba*, no. 9593000445, Inst. Agencia de Medio Ambiente (AMA), La Habana, Cuba, 15 p., 2014.
- REBOLLEDO, M.C.; RAMÍREZ, V.J.; GRATEROL, M.E.; HERNÁNDEZ, V.C.A.; RODRÍGUEZ, E.J.; PETRO, P.E.E.; PINZON, S.; HEINEMANN, A.; RODRÍGUEZ, B.J.M.; VAN DEN, B.M.: "Modelación del arroz en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización", En: ser. JRC110177, Ed. Publications Office of the European Union, Luxembourg, p. 74, publisher: Publications Office of the European Union, JRC110177, 2018, DOI: <https://dx.doi.org/10.2760/18081>, ISBN: 978-92-79-77337-2.
- ROJÁN, H.O.; MAQUEIRA, L.L.A.; TORRES, de la N.W.: "Variabilidad del rendimiento en cultivares de soya (*Glycine max* L.). Parte I. Época de frío", *Cultivos Tropicales*, 40(1), 2019, ISSN: 0258-5936, e-ISSN: 1819-4087, Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362019000100008&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000100008&lng=es&nrm=iso).
- ROSADI, R.A.B.; SENGE, M.; ITO, K.; ADOMAKO, J.: "The effect of water deficit in typical soil types on the yield and water requirement of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) in Indonesia", *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 41(1): 47-52, 2007, ISSN: 0021-3551.
- STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, Ed. Estudio FAO Riego y Drenaje 66, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4.
- UTRÍA, E.: *Modelación para la estimación de las normas netas de riego de la papa en la zona central de Cuba según la variabilidad climática*, Universidad Agraria de la Habana, Facultad de Agronomía, Tesis de grado presentada en opción al título de ingeniero agrónomo, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2018.

---

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@boyeros.iagric.cu](mailto:felicita.gonzalez@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8245-4070>

Enrique Cisneros-Zayas, 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: [enrique.cisneros@boyeros.iagric.cu](mailto:enrique.cisneros@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1021-0680>

Guillermo Hervis-Granda, Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana, Cuba. e-mail: [ghervisg@gmail.com](mailto:ghervisg@gmail.com) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5272-7728>

Luis Hirán Riverol-Marrero, Especialista, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Boyeros, La Habana, Cuba. e-mail: [luis.riverol@boyeros.iagric.cu](mailto:luis.riverol@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9298-1034>

Julián Herrera-Puebla, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAGric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: [julian.herrera@boyeros.iagric.cu](mailto:julian.herrera@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1015-6661>

Greco Cid-Lazo, 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: [greco.cid@boyeros.iagric.cu](mailto:greco.cid@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8039-469X>

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

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC 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.