

Impactos de una fluctuación climática sobre el arroz, maíz y soya en Camagüey – Sancti Spiritus

Impacts of a climate fluctuation over rice, maize and soybean on Camagüey – Sancti Spiritus region

Roger E. Rivero-Vega[✉], Zoltan I. Rivero-Jaspe y Roger R. Rivero-Jaspe

Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Camagüey, Cuba

Resumen

Un conflicto nuclear entre potencias nucleares emergentes como India y Paquistán puede inyectar en la estratosfera unos 5 Tg de aerosoles carboníferos provocando una fluctuación climática planetaria. El desarrollo fenológico así como los rendimientos potenciales y de secano de los cultivos de arroz, maíz y soya en la región Camagüey – Sancti Spiritus fueron estudiados empleando escenarios climáticos basados en el clima base 1993 – 2013 y las anomalías de radiación global, temperatura y precipitaciones simuladas por el Modelo E de GISS durante los 10 años posteriores al conflicto. Se utilizaron bases diarias de radiación global, temperaturas máximas, mínimas, y precipitaciones así como simulaciones numéricas realizadas con el modelo biofísico de cultivo WOFOST 7.1.2. Los resultados obtenidos indican una ralentización de los procesos fisiológicos que se caracteriza por un incremento de la duración en días de la fase vegetativa y un incremento de la duración total del ciclo de cultivo en el campo. La ralentización de los procesos fisiológicos, y condiciones climáticas más frescas y húmedas que las del clima base, fue acompañada de incrementos en los rendimientos potenciales y de secano para los cultivos en todas las fechas de siembra y más notables durante los primeros cinco años tras ocurrido el conflicto nuclear.

Palabras clave: conflicto nuclear, fenología, rendimientos potenciales y de secano

Abstract

A low intensity nuclear conflict between two emergent nuclear powers as India and Pakistan could lead to the stratospheric injection of 5 TG of carbon aerosols generating a planetary climate fluctuation. Daily databases of maximum and minimum temperature, global solar radiation and precipitation corresponding to meteorological stations in the region Sancti Spiritus – Camagüey were combined with monthly anomalies simulated by the GISS Model E creating climate scenarios used as data input for the WOFOST 7.1.2 biophysical model during the ten years period affected by the fluctuation. Results showed a decrease in rate of phenological processes leading to an increase in the length of crops phenological stages such as the vegetative stage and total duration

[✉] Autor para correspondencia: Roger E. Rivero-Vega. E-mail: rogercmg@caonao.cu

Recibido: 20/9/2017

Aceptado: 6/12/2017

to field maturity. This process combined with cooler and wetter climate conditions lead to an increase in potential and rainfed yields for all planting dates which are more relevant during the first five years after the nuclear conflict.

Keywords: Nuclear conflict, phenology, potential and rainfed yields

INTRODUCCION

El hecho de que un conflicto nuclear de alta intensidad entre superpotencias podría inyectar en la estratosfera grandes cantidades, del orden de 100-150 Tg. de aerosoles carboníferos causando una catastrófica reducción de la radiación solar en superficie y un formidable descenso global de las temperaturas fue señalado ya desde la década de los 80 del pasado siglo utilizando los modelos globales propios de la época ([Turco et al., 1984](#); [Velikhov, 1985](#)). Durante la época de la guerra fría este fenómeno fue denominado como “invierno nuclear” y en ese mismo período las consecuencias de tal fluctuación climática sobre la producción de los ecosistemas naturales y agrícolas fue discutida solo de forma cualitativa ([Velikhov, 1985](#)).

No fue hasta comienzos del presente siglo que pudo verificarse que una confrontación de baja intensidad usando tales tipos de armas entre potencias nucleares emergentes, como la India y Paquistán, podría inyectar en la estratosfera unos 5 Tg de aerosoles carboníferos e inducir así una fluctuación climática global con duración de unos 10 años que podría tener impactos desastrosos sobre la producción global de alimentos ([Robock et al., 2007a y b](#); [Toon et al., 2008](#); [Robock & Toon, 2010](#)).

Los primeros resultados cuantitativos del impacto de tal fluctuación sobre la producción de un cultivo concreto como el arroz en China fue realizada por [Xia y Robock \(2013\)](#), lo que fue seguido por una evaluación similar sobre la producción de maíz y soya en el Medio Oeste de los Estados Unidos por [Ozdogan et al., \(2013\)](#), empleando metodologías diferentes. Es necesario señalar sin embargo que las regiones incluidas poseen climas diferentes al de Cuba.

Fue entonces el objetivo principal del presente trabajo el determinar el impacto de la

misma fluctuación climática derivada de la confrontación de baja intensidad sobre el desarrollo fenológico así como sobre los rendimientos potenciales y de secano de los cultivos de arroz, maíz y soya en la región Sancti Spiritus – Camagüey. Los procedimientos metodológicos utilizados fueron también diferentes, tanto en el tratamiento de los datos climáticos utilizados a la entrada de los modelos de impacto como por el uso de un modelo biofísico de cultivo distinto, y con vocación ambientalista, a los usados con anterioridad para tales fines.

MATERIALES Y METODOS

Series de datos diarios correspondientes al período 1993-2013 tomados como clima base para 9 estaciones meteorológicas enclavadas en la región de llanuras de las provincias de Sancti Spiritus, Ciego de Ávila y Camagüey. No contando con series observadas de radiación solar global, esta variable fue estimada por la fórmula de Hargreaves calibrada contra una base de radiación solar observada en la estación meteorológica de Camagüey ([Allen et al., 1998](#); [Rivero et al., 2013](#)).

Las anomalías mensuales de radiación solar global, temperatura y precipitaciones respecto a la corrida de control del Modelo E de GISS en 22N y 80W a consecuencia de un conflicto nuclear de baja intensidad ocurrido un 15 de mayo entre India y Pakistán que hubiese inyectado 5 Tg de aerosoles carboníferos en la estratosfera. y correspondientes a 10 años sucesivos, fueron gentilmente suministradas por Alan Robock y colaboradores ([Robock et al., 2007b](#)).

Los escenarios que describen la fluctuación climática para cada estación meteorológica en la región de estudio fueron creados aplicando las anomalías previstas por el modelo global a cada día de la serie diaria de cada año del clima

base. Esto condujo a la creación de 20 secuencias de 10 años consecutivos de datos diarios para cada estación. La forma recomendada de crear tales escenarios ([Xia y Robock, 2013](#); [Ozdogan et al., 2013](#)) incluye un trato diferenciado de las temperaturas máximas y mínimas mientras que la corta longitud de las series permitió no tomar en cuenta el efecto de fertilización por dióxido de carbono ([Benioff et al., 1996](#); [Rivero, 2008](#)).

Los estudios de impacto de los cambios climáticos acostumbra asumir que el incremento esperado de la temperatura se aplica igualmente a las temperaturas máximas y mínimas pero esto no es así en este caso ya que se espera que el efecto del apantallamiento de la radiación solar global sobre áreas terrestres será más notable sobre las máximas que sobre las mínimas. Siguiendo un razonamiento similar al de [Ozdogan et al. \(2013\)](#) se decidió entonces aplicar las anomalías de temperatura media sobre las máximas y las mínimas de modo tal que el cociente de las anomalías en estas últimas variables fuese igual a cuatro.

La razón de esto consiste en que la generalidad de los modelos biofísicos, incluyendo los de la serie WOFOST, no requieren de la temperatura media como dato de entrada sino de las máximas y mínimas ya que si en las parametrizaciones internas se requiere del valor medio de las temperaturas este es calculado por el procedimiento tradicional dado por:

$$T_{media} = (T_{max} + T_{min}) / 2$$

Si la anomalía de la temperatura media es de Y grados entonces habría que garantizar que las nuevas temperaturas máximas y mínimas sean tales que:

$$T_{media} + Y = (T_{max} + a Y + T_{min} + b Y) / 2 \\ = T_{media} + (a Y + b Y) / 2$$

Con las condiciones,

$$a = 4 b$$

$$a + b = 2$$

La solución del sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas conduce a la solución dada por:

$$b = 2 / 5 = 0.4$$

$$a = 4 (2 / 5) = 1.6$$

De haberse escogido que el 80% de la anomalía de T_{media} se aplicase a T_{max} y el 20% a T_{min} ([Ozdogan et al., 2013](#)) hubiéramos llegado al resultado absurdo de que:

$$T_{media} + Y = T_{media} + (0.8 Y + 0.2 Y) / 2 \\ = T_{media} + (Y / 2)$$

Esto último evidentemente contradice el planteamiento inicial de que la anomalía de la temperatura media era igual a Y .

Los rendimientos potenciales estudiados en este resultado son solo función de parámetros genéticos del cultivo, la radiación solar global y la temperatura media diaria ([Diepen et al., 1988](#); [Diepen et al., 1989](#); [Rivero, 2008](#)). Sin embargo la simulación de los rendimientos de secano requieren el cálculo del balance hídrico del suelo y esto necesita de la especificación de un parámetro de humedad del aire cuyas anomalías no fueron precisadas. Para enfrentar este problema se recurrió a un procedimiento que en la literatura nacional se ha dado en llamar de Bultot ([Rivero et al., 1999](#)) y que fuera discutido por [Wolf y Diepen \(1993\)](#).

Es conocido que muchos modelos de clima global, exceptuando algunos como el HadCM3 y el HadGEM, no suelen simular la humedad relativa ([Goose et al., 2008](#); [Cintra de Jesús et al., 2008](#)). Del mismo modo estudios nacionales con varios modelos globales indican que a consecuencia del cambio climático no deben esperarse variaciones importantes en los valores de radiación solar global y velocidad del viento sobre el área ([Fonte et al., 2002](#)).

Tomando en cuenta tales antecedentes se decidió aplicar el método de Bultot a las variables humedad relativa y velocidad media del viento en los escenarios que describen la fluctuación climática estudiada postulando en tales escenarios que la humedad relativa y la

velocidad del viento permaneciesen iguales a las del clima base. Debe señalarse aquí que las variables que representan la humedad atmosférica y la velocidad del viento son usadas en el modelo de impacto solo para estimar la evapotranspiración potencial de referencia por el método de Penman modificado de la FAO y no ejercen ningún efecto directo sobre el cultivo sino solo sobre el balance hídrico del suelo.

Es también imprescindible resaltar que mantener la humedad relativa igual a sus valores en el clima base cambia las condiciones del término advectivo de la ecuación de evapotranspiración potencial de referencia debido a que la variable de entrada del modelo de cultivo no es la humedad relativa sino la tensión de vapor dada como:

$$e = (HR / 100) * e (sat)$$

Dado que la tensión de vapor de saturación $e(sat)$ es función de la temperatura según la fórmula de Tetens resulta que en estos escenarios la preservación de los valores de humedad relativa del clima base en los escenarios futuros sí implica una variación en los valores de la tensión de vapor. Dado que todas las anomalías de temperatura en el presente caso son negativas esto conlleva a un decrecimiento de los valores de la tensión de vapor en los escenarios con respecto al clima base. Esto es lo contrario de lo que ocurre en los escenarios usuales de cambio climático.

El modelo biofísico de cultivo utilizado en el presente resultado es una de las versiones más recientes de los modelos de la serie WOFOST pertenecientes a la escuela holandesa de modelación creada por de [Wit \(1965\)](#), en este caso el WOFOST 7.1.2 controlado desde el sistema WCC 1.7 ([Boogaard et al., 1998](#)).

Los modelos de esta serie contienen un submodelo de desarrollo fenológico que reconoce solo dos fases fenológicas, una primera fase vegetativa que abarca desde la emergencia del cultivo en el campo hasta la floración y una segunda fase generativa (reproductiva) que abarca desde la floración hasta la formación y maduración del fruto. En

los modelos de esta serie el desarrollo fenológico no depende en absoluto ni de la radiación solar global ni de las precipitaciones por lo que la duración de las fases fenológicas es la misma si se cultiva en condiciones óptimas para obtener rendimientos potenciales o en condiciones de limitación por agua o de secano.

Los modelos biofísicos como los de la serie WOFOST no son modelos estadísticos. Una parte considerable de la descripción matemática de estos procesos puede verse en [Rivero \(2008\)](#) así como en [Benioff et al. \(1996\)](#), en las aplicaciones de ayuda suministradas en las versiones más avanzadas de tales modelos así como en el código fuente de la versión 4.1 ([Diepen et al., 1988](#)) y del WOFOST 7.1.2. Los resultados alcanzados por la escuela holandesa han sido utilizados numerosas veces en estudios de carácter general para la aplicación en países del mundo en desarrollo ([IIASA/FAO, 2012](#)).

En los modelos de la escuela holandesa basada en el trabajo original de Wit ([de Wit, 1965](#)) el rendimiento potencial es definido como aquel que es alcanzable por un cultivar en condiciones de manejo óptimo con todas sus necesidades de agua y nutrientes satisfechas así como totalmente libre de afectación por plagas, enfermedades y malas hierbas. Este manejo óptimo es de difícil expresión en la actividad diaria de la producción agrícola y pueden ser obtenidos solo bajo condiciones de altos insumos, eficiencia y disciplina tecnológica.

Lo más relevante en este caso es que los rendimientos potenciales simulados son totalmente independientes del suelo en que son cultivados así como de las precipitaciones. Como es usual en los modelos de su tipo todos los rendimientos, así como el peso de las diferentes partes de las plantas son estimados en materia seca (MS) sin considerar el aporte de su contenido en agua.

Los rendimientos limitados por agua o rendimientos de secano sí reconocen la presencia del suelo como mediador entre las precipitaciones y el proceso de extracción de agua contenida en este por el sistema de raíces. Una estimación de sus valores requiere

entonces la especificación de un suelo concreto para el cálculo del balance hídrico del ecosistema de cultivo en cada paso diario de integración. Todas las simulaciones de secano en el presente resultado fueron realizadas utilizando un suelo de textura media – fina con una capacidad máxima de agua disponible de 250 mm por metro de profundidad. A este suelo no se le impusieron limitaciones de profundidad efectiva.

Las simulaciones fueron hechas para tres cultivos de gran interés que generalmente son cultivados en Cuba con manejo de alta tecnología como el arroz, maíz y soya. Esto tiene la ventaja de que tanto el arroz como el maíz pueden considerarse representativos de grandes familias de plantas con numerosas variedades diferentes pero con características fisiológicas semejantes por ser de clima cálido y con ciclos fotosintéticos diferentes (C3 y C4). Todos los cultivares estudiados poseen hábitos de crecimiento y desarrollo determinados.

Para cada localidad se especificaron fechas de emergencia correspondientes al día 16 de cada mes del año para cada uno de los 20 años del período 1993 – 2012 y los 10 años escenarios correspondientes tomando cada uno de ellos como posible año de ocurrencia del conflicto nuclear. La cantidad de simulaciones realizadas para cada fecha de emergencia en una localidad alcanza la cifra de 220 y arroja un total de 2640 simulaciones contando las correspondientes al clima base y los climas escenarios con todas las fechas de emergencia adoptadas.

Estando dentro de la zona de vecino más cercano al punto de rejilla donde se especificaron las anomalías calculadas por el modelo E de clima global la localidad de Sancti Spiritus fue utilizada para ilustrar las respuestas esperadas de los cultivos escogidos en la región de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSION

Impacto sobre el Desarrollo Fenológico de los Cultivos

El impacto de la fluctuación climática sobre el desarrollo fenológico de los cultivos es el mismo con independencia del manejo agrícola – ya sea de regadío o de secano – por lo que es analizado una sola vez en el presente trabajo. Las fases fenológicas estudiadas fueron una fase vegetativa que se extiende hasta la floración y la duración total del período que va desde la emergencia hasta la maduración en el campo.

Durante toda la extensión en tiempo de la fluctuación climática la duración en días de la fase vegetativa para los tres cultivos aumenta en relación con sus valores medios para el clima de referencia en todas las fechas de siembra. La máxima duración en días de esta fase no ocurre el propio año del conflicto nuclear sino durante los años de la primera mitad del período afectado - del segundo al cuarto o quinto año - al tiempo que un máximo secundario aparece durante el séptimo u octavo año mientras las respuestas fenológicas se acercan de nuevo a sus valores medios en el clima normal ([Figuras 1, 2, 3, 4](#)).

En todas las figuras representadas cada punto es el valor medio de 20 años del clima base - aquí denominado año 0 - y los valores medios de 20 años anómalos para cada año del clima base alterado por las anomalías correspondientes. Una variación irregular de la duración de esta fase para el mes de enero es el resultado de que el modelo E generó anomalías de todas las variables aún para los meses de enero – abril del primer año antes de producirse el conflicto nuclear.

La respuesta esperada de la duración en días a maduración para todos los cultivos presenta un comportamiento similar al ya descrito para

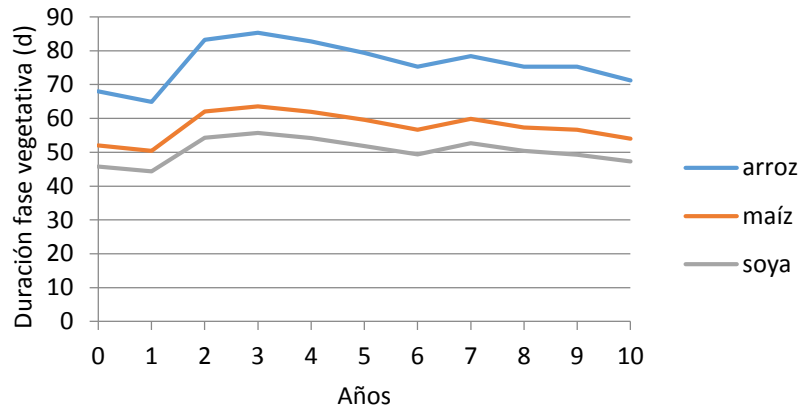


Figura 1. Duración en días de la fase vegetativa de los cultivos para siembra en enero en el clima base y 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

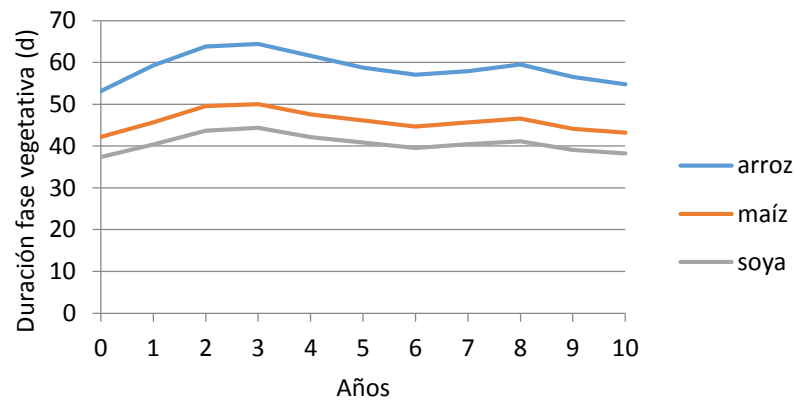


Figura 2. Duración en días de la fase vegetativa de los cultivos para siembra en abril en el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

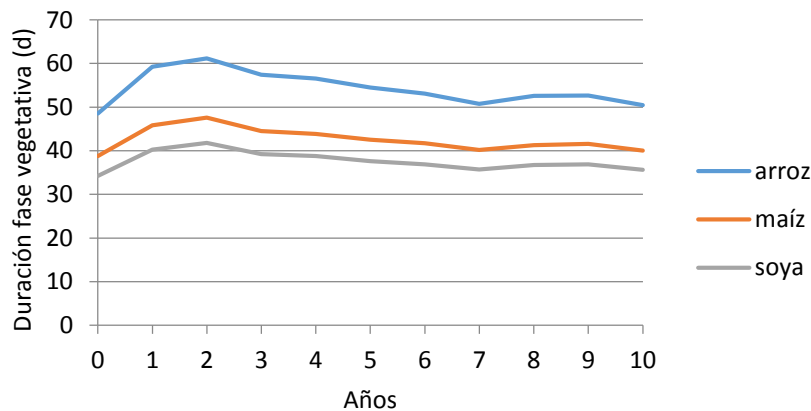


Figura 3. Duración en días de la fase vegetativa de los cultivos para siembra en julio en el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

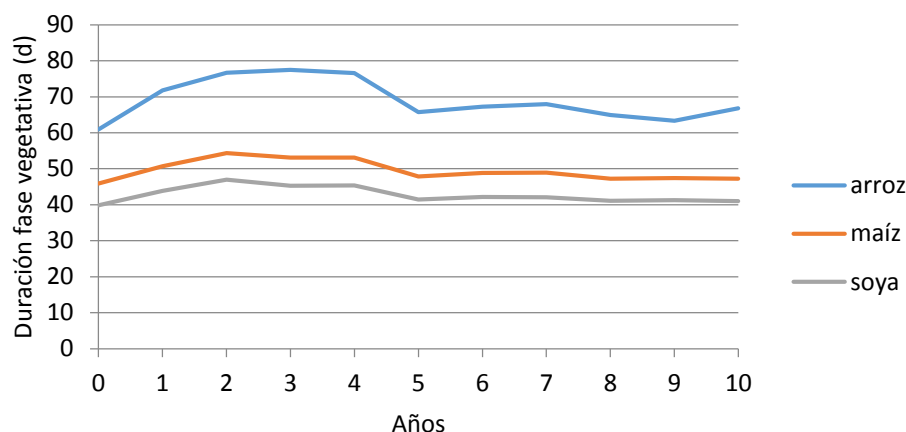


Figura 4. Duración en días de la fase vegetativa de los cultivos para siembra en octubre en el clima base y 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

la fase vegetativa, como puede observarse en las [figuras 5, 6, 7, 8](#). Sin embargo siempre se observan variaciones que pueden ser de interés entre una fecha de siembra y otra o entre años posteriores al conflicto. Así vemos que el año 1 posee un valor elevado para la fecha de emergencia en junio lo que es producto de que habiendo ocurrido el conflicto el 15 de mayo ya el período junio – septiembre de ese año está afectado en gran medida por la nube global de aerosoles estratosféricos.

Del análisis de los cambios en la duración en días de las fases fenológicas puede decirse que como efecto del enfriamiento que caracteriza la fluctuación climática estudiada se produce una ralentización de los procesos fisiológicos en las plantas de cultivo que conduce a retardar su ciclo de crecimiento y desarrollo en el campo. Esta ralentización podría producirse en otras plantas así como en plagas u otros insectos, que no constituyen necesariamente plagas agrícolas, pero cuyos ciclos fenológicos son controlados por las temperaturas ([Kulicov y Rudnev, 1980](#); [Schröder et al. 2014](#)).

Impacto sobre los Rendimientos Potenciales de los Cultivos

Tal y como ha sido señalado en epígrafes anteriores y en la literatura de referencia se denominan rendimientos potenciales a aquellos que pueden ser alcanzados por un cultivo

determinado en condiciones óptimas de manejo en un clima dado. Tales condiciones óptimas de manejo son sumamente difíciles de alcanzar en la práctica conllevando esto a que los rendimientos de campo reales sean generalmente menores que los potenciales. La brecha existente entre rendimientos reales de campo y rendimientos potenciales es a veces utilizada como una medida de la eficiencia tecnológica del manejo agrícola. El regadío constituye una forma de manejo agrícola por lo que los rendimientos potenciales son análogos de los rendimientos de manejo con regadío óptimo.

Por definición el rendimiento potencial de un cultivar dependerá solamente de factores genéticos, niveles de radiación solar global y temperaturas propias del clima en que se cultive en condiciones de manejo óptimo. Esta definición implica también una densidad óptima de siembra. En modelos como el WOFOST los cultivos considerados como genéricos tienen este parámetro definido por defecto aunque puede ser modificado según el criterio del usuario.

Tendencias de los rendimientos potenciales en el marco de la fluctuación.

La elevación de la radiación solar global tiende a aumentar los rendimientos potenciales y su reducción a decrecerlos ([Diepen et al., 1988](#)). Es de esperar entonces que la caída de

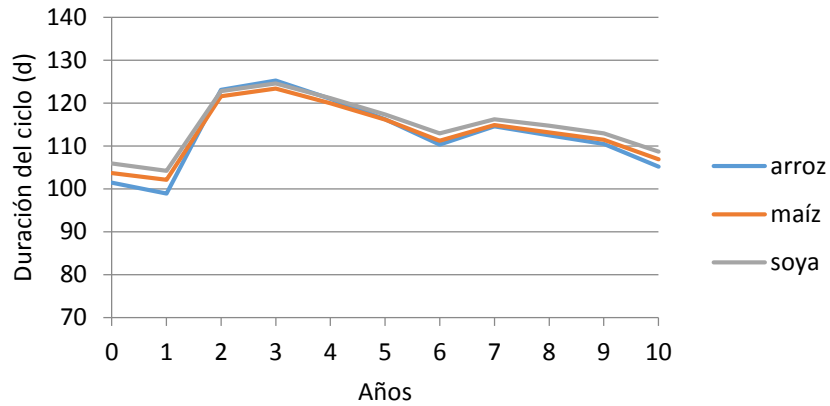


Figura 5. Duración del ciclo total a maduración con fecha de siembra en enero en el clima base y en los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

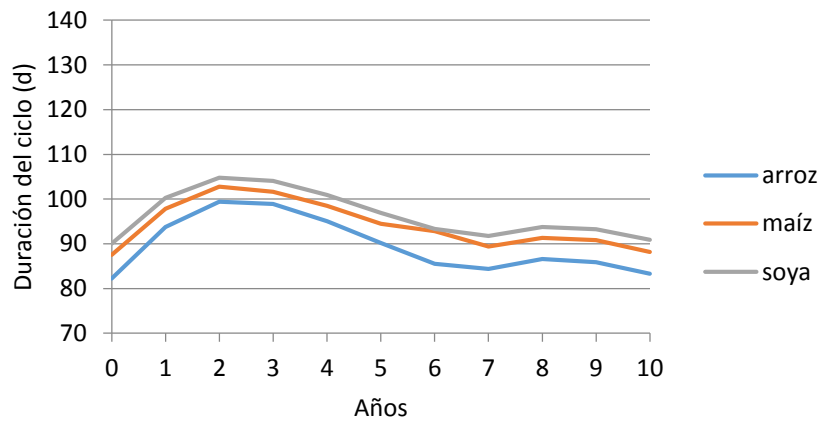


Figura 6. Duración en días del ciclo total de cultivo con fecha de siembra en abril en el clima base y en los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

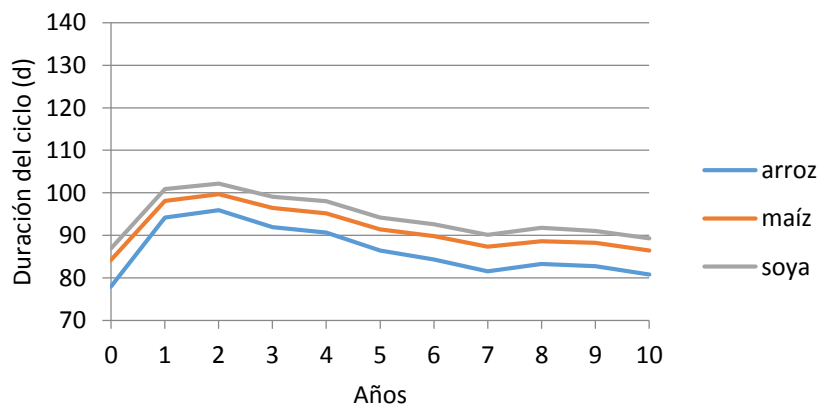


Figura 7. Duración en días del ciclo total de cultivo con fecha de siembra en julio en el clima base y en los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

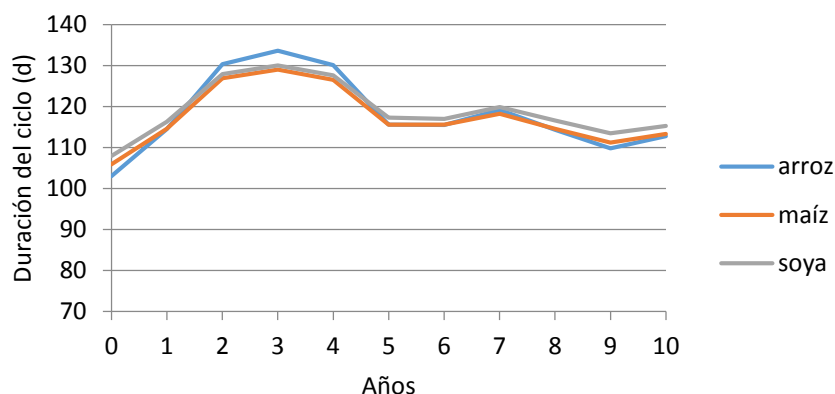


Figura 8. Duración en días del ciclo total de cultivo con fecha de siembra octubre en el clima base y en los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

los valores de radiación solar durante la fluctuación climática ejercería el efecto de decrecer los rendimientos potenciales.

Sin embargo la disminución de la temperatura, en las condiciones del clima de Cuba, disminuiría las pérdidas de biomasa neta por respiración de mantenimiento mejorando las condiciones en que se desarrollan los cultivos (Rivero, 2008). Como esto se vería acompañado del aumento de la duración de las fases fenológicas, permitiendo a los cultivos recibir radiación solar por mayor período de tiempo, el efecto podría ser el elevar los rendimientos potenciales. Esto es lo contrario a lo previsto en condiciones del recalentamiento global y el cambio climático en progreso (Rivero *et al.*, 1999; Rivero, 2008). Dado que ambos efectos producen resultados diferentes – decrecimiento por radiación versus elevación por temperatura – es la combinación de estos efectos lo que decide si los rendimientos potenciales aumentan o disminuyen durante la fluctuación climática. Esto depende de la magnitud relativa entre las anomalías de ambas variables.

Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que las medias multianuales de los rendimientos potenciales son superiores a sus valores en el clima base durante toda la fluctuación (Figuras 9, 10, 11, 12).

Los rendimientos simulados con el modelo de cultivo alcanzan un máximo primario durante la primera mitad de la duración de la fluctuación, alrededor del segundo a quinto año, y un máximo secundario alrededor del séptimo u octavo año. Sin embargo tales máximos primarios resultan menos notables para los cultivos con fechas de emergencia en julio.

Es posible concluir que en el caso de la fluctuación climática estudiada la influencia del descenso de las temperaturas sobre el desarrollo fenológico y los procesos fisiológicos de las plantas de cultivo resulta superior a la influencia del decrecimiento de la radiación solar conduciendo así al incremento medio de los rendimientos potenciales (Tabla 1 y 2).

Tendencias de los rendimientos de secano en el marco de la fluctuación

Los rendimientos limitados por agua o de secano son aquellos que pueden obtenerse en condiciones de manejo donde la única fuente de abastecimiento de agua del cultivo proviene de las precipitaciones. Resulta siempre difícil comparar resultados obtenidos en Cuba con los obtenidos en muchos países desarrollados de zonas templadas ya que tales climas suelen carecer de una verdadera estación seca. La presencia de una estación seca definida en Cuba es un hecho de gran importancia para la agricultura. En zonas de notoria producción en

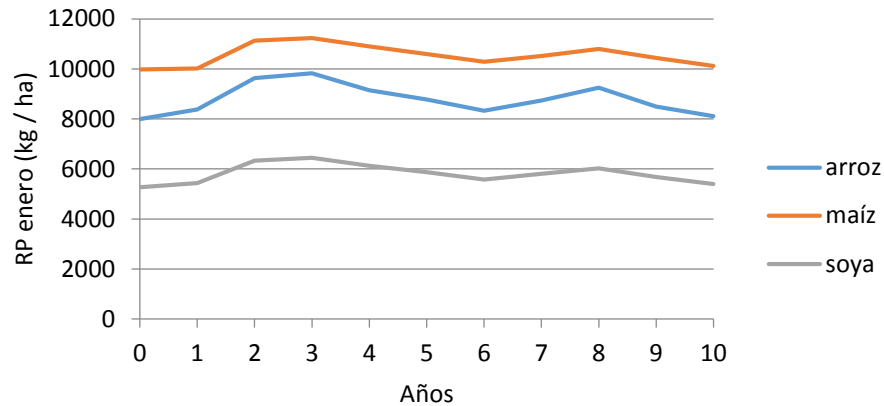


Figura 9. Rendimientos potenciales con siembra en enero para el clima base y los 10 años de la fluctuación en Sancti Spiritus

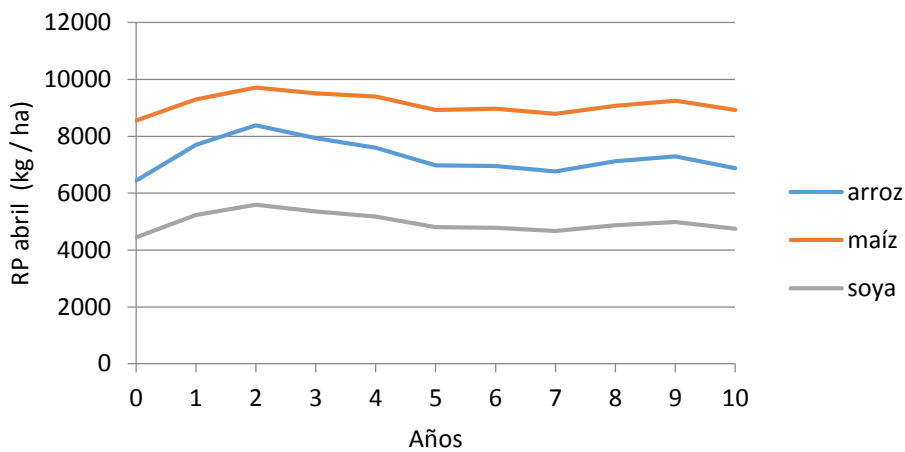


Figura 10. Rendimiento potencial de los cultivos con siembra en abril para el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

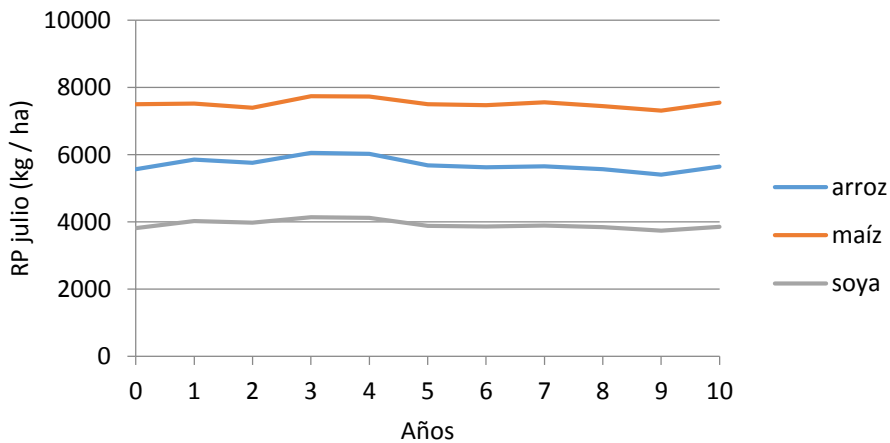


Figura 11. Rendimiento potencial de los cultivos con siembra en julio para el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

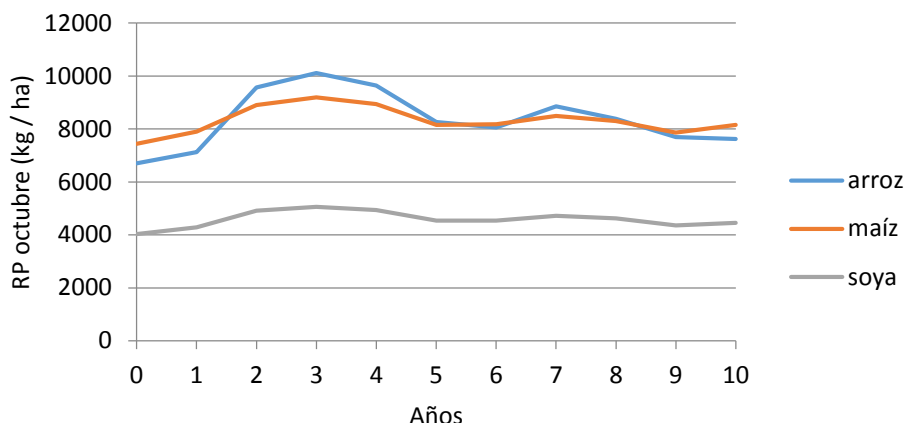


Figura 12. Rendimiento potencial de los cultivos con siembra en octubre para el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

Tabla 1. Máximos y mínimos rendimientos potenciales para distintas fechas de emergencia en el clima base de Sancti Spiritus (kg MS / ha)

Cultivo	Enero	Abril	Julio	Octubre
Máximo Arroz	9087	6841	5872	8501
Mínimo Arroz	7119	5769	5109	4681
Máximo Maíz	10631	8976	7818	8462
Mínimo Maíz	9364	7765	7057	5927
Máximo Soya	5706	4688	3990	4540
Mínimo Soya	4907	4005	3522	3111

Tabla 2. Máximos y mínimos rendimientos potenciales para distintas fechas de emergencia en Sancti Spiritus en el tercer año de la fluctuación (kg MS / ha)

Cultivo	Enero	Abril	Julio	Octubre
Máximo Arroz	10938	8473	6450	12993
Mínimo Arroz	7435	6631	5327	7629
Máximo Maíz	12010	9953	8137	10349
Mínimo Maíz	9803	8642	7038	7592
Máximo Soya	6933	5675	4408	5849
Mínimo Soya	5471	4734	3725	4199

latitudes medias ella está limitada por las temperaturas mientras que en Cuba se encuentra limitada por las precipitaciones (Rivero y Rivero, 2011). Resulta ilustrativo discutir la brecha que se produce entre los rendimientos potenciales y los de secano en el clima de referencia durante la estación seca del año (Figuras 13, 14, 15). Los rendimientos de

secano son prácticamente iguales a los potenciales durante el período de abril a septiembre – que coincide en general con la estación lluviosa – pero ambos tipos de rendimiento divergen durante la estación seca con diferencias máximas en el período de diciembre a enero.

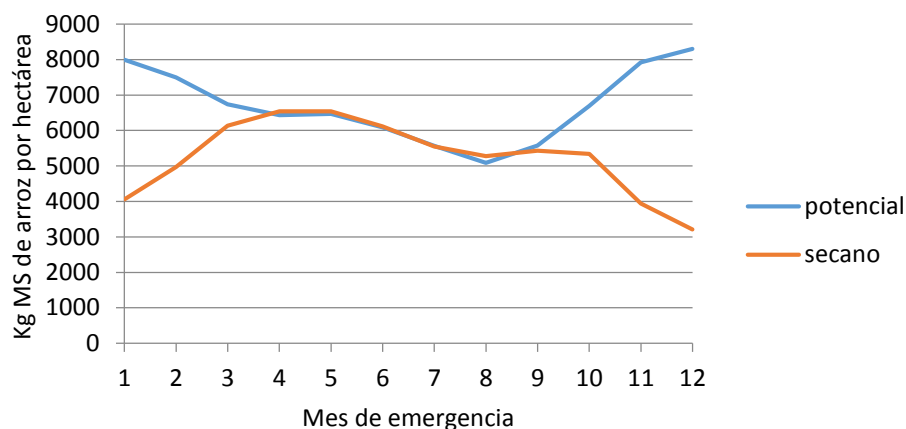


Figura 13. Rendimientos medios potenciales y de secano (Materia Seca) para el arroz en el clima base de Sancti Spiritus

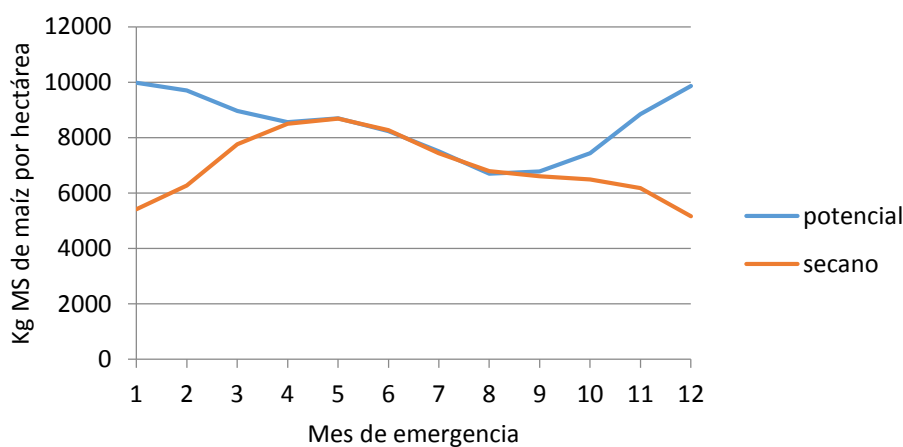


Figura 14. Rendimientos medios potenciales y de secano (Materia Seca) para el maíz en el clima base de Sancti Spiritus

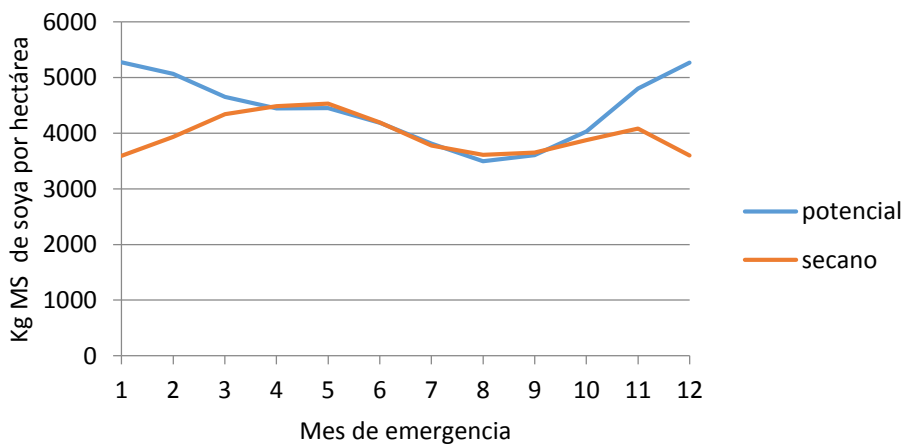


Figura 15. Rendimientos medios potenciales y de secano (Materia Seca) para la soya en el clima base de Sancti Spiritus

Los rendimientos de secano aumentan con respecto a sus valores en el clima base durante el período abarcado por la fluctuación climática para todas las fechas de siembra. Los valores máximos para este indicador son alcanzados durante los primeros 2 – 3 años de la fluctuación pero los incrementos son menos notables para las fechas en que el ciclo de producción transcurre dentro de la estación

lluviosa ya que incluso en el clima base los rendimientos de secano son cercanos a los potenciales para esta época del año (Figuras 16, 17, 18, 19).

La variabilidad de los rendimientos de secano es considerablemente mayor que la de los potenciales, lo cual hace muy riesgoso el cultivo en tales condiciones de manejo durante las estaciones más secas del año (Tablas 3 y 4).

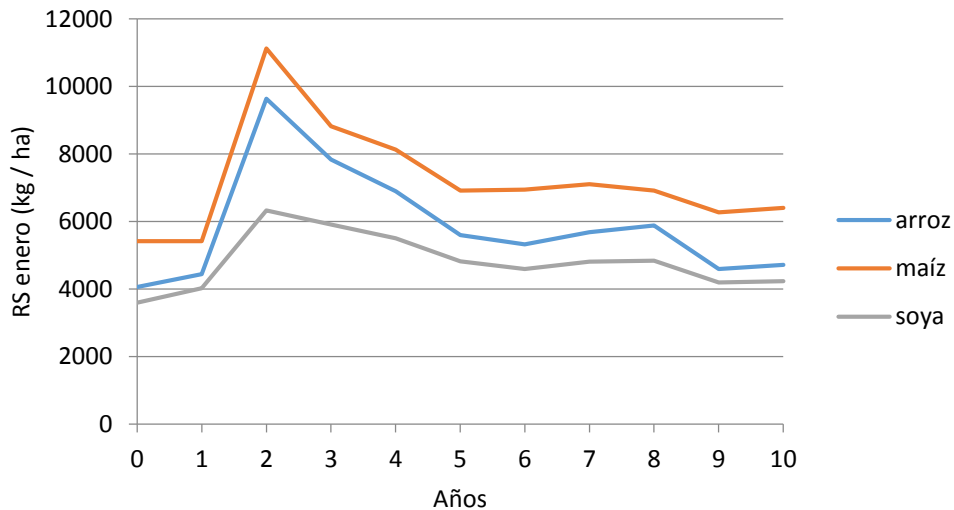


Figura 16. Rendimientos de secano con siembra en enero para el clima base y los 10 años de la fluctuación en Sancti Spiritus

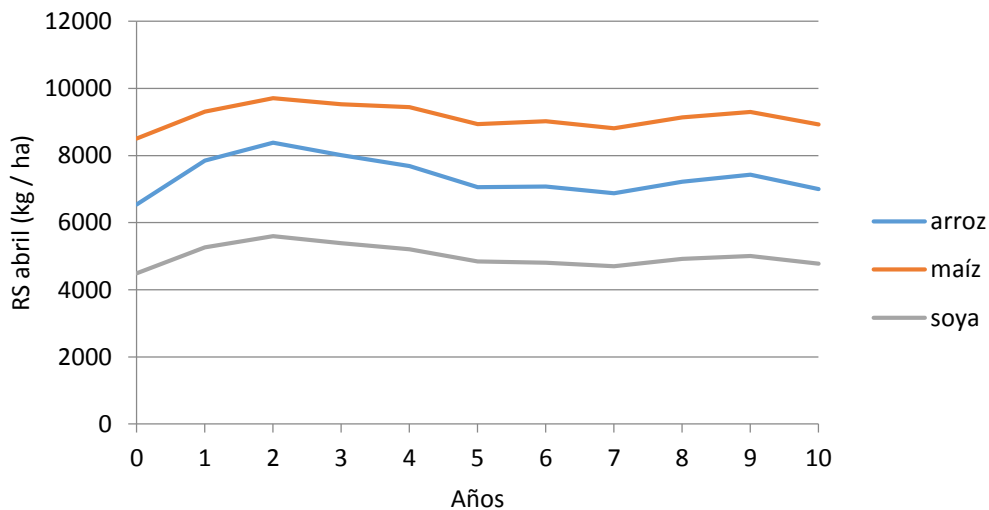


Figura 17. Rendimiento de secano de los cultivos con siembra en abril para el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

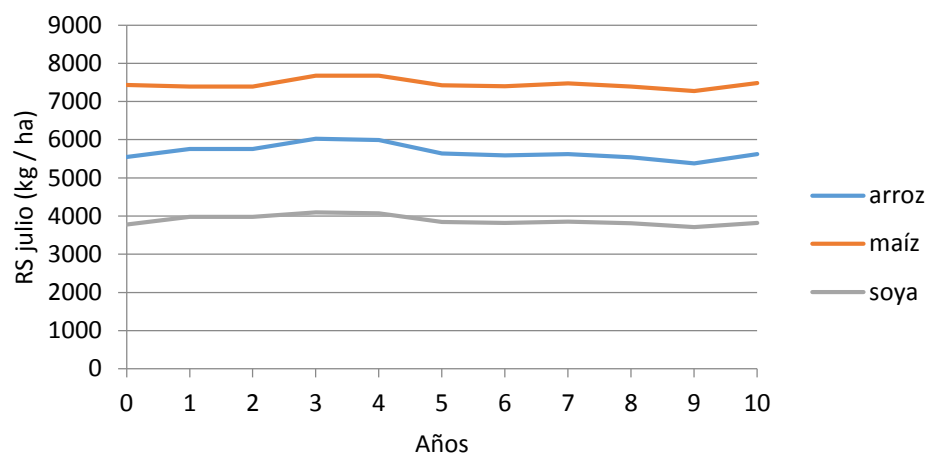


Figura 18. Rendimiento de secano de los cultivos con siembra en julio para el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

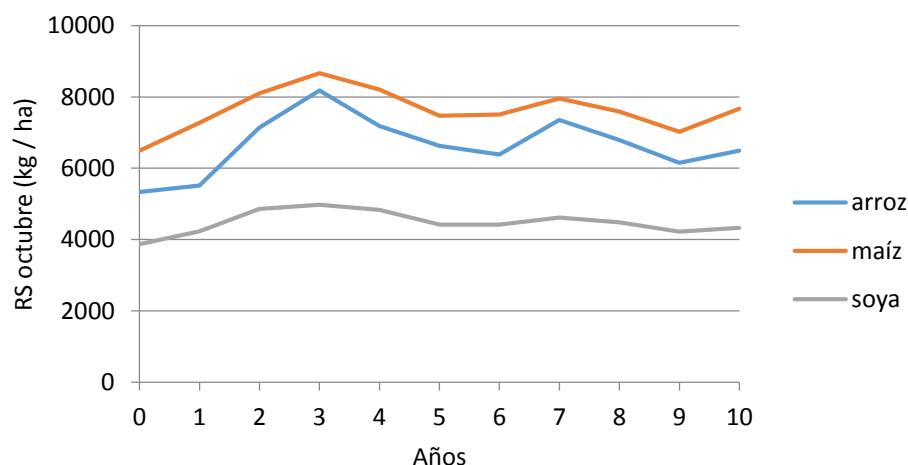


Figura 19. Rendimiento de secano de los cultivos con siembra en octubre para el clima base y los 10 años afectados por la fluctuación en Sancti Spiritus

Tabla 3. Máximos y mínimos rendimientos de secano para distintas fechas de emergencia en el clima base de Sancti Spiritus (kg MS / ha)

Cultivo	Enero	Abril	Julio	Octubre
Máximo Arroz	9087	7117	5876	8501
Mínimo Arroz	263	5880	5109	320
Máximo Maíz	10631	9182	7929	8053
Mínimo Maíz	699	7838	6711	828
Máximo Soya	5706	4844	4042	4554
Mínimo Soya	932	4051	3459	473

Tabla 4. Máximos y mínimos rendimientos de secano para distintas fechas de emergencia en Sancti Spiritus durante el tercer año de la fluctuación (kg MS /ha)

Cultivo	Enero	Abril	Julio	Octubre
Máximo Arroz	10780	8481	6365	12993
Mínimo Arroz	3006	6665	5327	553
Máximo Maíz	11756	9813	8137	10318
Mínimo Maíz	2469	8736	7019	2989
Máximo Soya	6933	5538	4320	5849
Mínimo Soya	2925	4740	3684	1853

CONCLUSIONES

Las anomalías negativas de la temperatura durante la fluctuación producen una ralentización de los procesos fisiológicos vegetales en los cultivos que conducen al incremento de la duración en días de sus fases fenológicas y de hecho una extensión del tiempo necesario para que estos alcancen su maduración. Esto alteraría los calendarios de labores agrotécnicas usuales en cualquier manejo tecnológico prevalecientes durante períodos anteriores a la fluctuación climática.

La ralentización de los procesos fisiológicos y del tiempo requerido para que las plantas transiten de uno a otro estadio fenológico son más notables durante la primera mitad del tiempo de duración de la fluctuación, con un máximo primario durante los primeros dos a cinco años, para luego regresar lentamente hacia sus valores normales en el clima base.

Los rendimientos potenciales de los cultivos, para todas las fechas de siembra, son superiores durante el período de duración de la fluctuación con un máximo primario contenido durante los primeros cinco años de ésta. Las diferencias entre los distintos cultivos y épocas de siembra han sido documentadas en este trabajo y no resultan contradictorias si se acepta que ya el clima actual de Cuba resulta muy cálido para el desarrollo de muchos de ellos durante algunas estaciones del año. Este hecho condiciona que gran parte de la producción agrícola en la región se lleve a cabo durante la estación más fría del año.

El comportamiento de los rendimientos de secano resulta similar al de los potenciales por cuanto ocurrió un aumento de los mismos más notable durante los primeros dos a tres años de la fluctuación. El clima base resultó más influyente en este tipo de rendimientos ya que la estación seca del año es por lo general inapropiada para este tipo de manejo. Esta circunstancia es especialmente notable para fechas de siembra en que parte del ciclo de cultivo tiene lugar durante la estación seca. Un análisis de la variabilidad en los rendimientos potenciales y de secano hizo visible que aún en tales circunstancias los rendimientos de secano se vieron favorecidos durante la fluctuación estudiada.

REFERENCIAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. & Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, 326 p.
- Benioff, R.; Guill, S. & Lee, J. 1996. *Vulnerability and adaptation assessments: An international Handbook*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 320 pp.
- Boogaard, H. L.; Diepen, C. A. van; Rötter, R. P.; Cabrera, J. M. C. A. & Laar, H. H. van. 1998. *User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5*. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen, Technical Document 52.
- Cintra de Jesus Júnior, W.; Valadares Júnior, R.; Cecílio, R. A.; Bucker, W.; Xavier Ribeiro

- do Vale, Francisco; Ramos Alves, Fabio & Pierce Anderson, Paul. 2008. "Worldwide geographical distribution of black sigatoka for banana: Predictions based on climate change models". Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), v.65, special issue, December 2008, 40-53 pp.
- de Wit, C. T. 1965. *Photosynthesis of leaf canopies*. Agricultural Research Reports No. 663, Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, 57
- Diepen, C. A. van; Wolf, J.; Keulen, H. van & Rappoldt, C. 1989. *WOFOST: a simulation model of crop production*. Soil Use and Management, Volume 5, Number 1, March 1989, 16-24 pp.
- Diepen, C. A. van; Rappoldt, C.; Wolf, J. & Keulen, H. van. 1988. *CWFS Crop Growth Simulation Model WOFOST. Documentation Version 4.1*. Centre for World Food Studies, Wageningen, Holland
- Fonte, A.; Rivero, R. E. & Rivero, R. R. 2002. "Escenarios de Cambio Climático para las Energías Solar y Eólica durante el Siglo XXI" CUBASolar 2002. *Revista Científica de las Energías Renovables*. Eco Solar, 2, Octubre - Diciembre, 4toA, ISSN: 1026 - 6004
- Goosse, H.; Barriat, P. Y.; Lefebvre, W.; Loutre, M. F. & Zunz, V. 2008. *Introduction to climate dynamics and climate modeling*. UCL, 159 p.
- IIASA/FAO. 2012. *Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0)*. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 179 p.
- Kulicov, V. A. & Rudnev, G. V. 1980. *Agrometeorología Tropical*. Editorial Científico Técnica, Ciudad de la Habana, 255 p.
- Ozdogan, M.; Robock, A. & Kucharik C. J. 2013. "Impacts of a nuclear war in South Asia on soybean and maize production in the Midwest United States". *Climatic Change* 116: 373-387 pp.
- Rivero, R. E. 2008. *Workbook of Climate Change Impacts Assessments in Agriculture: Basic Knowledge, Methodologies and Tools*, CCCCC / INSMET / Commonwealth Secretariat, 148 p. ISBN 978-976-95260-1-3 (PBK)
- Rivero, R. E.; Gómez, G.; Álvarez, A.; Rivero, R. R.; García, D. R.; Martínez, I. C. *et al.* 1999. *Agricultura y Silvicultura. En Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Informe Final Proyecto No. FP / CP / 2200-97-12*, Instituto de Meteorología, La Habana, 81 - 130 pp.
- Rivero, Z. I. & Rivero, R. E. 2011. "Los ecosistemas terrestres en Cuba según diferentes escenarios de cambios climáticos incluyendo el efecto de fertilización por dióxido de carbono", II Congreso Internacional de Cambios Climáticos de la VIII Convención de Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, 4 - 8 Julio 2011, 20 pp. ISBN: 978-959-300-018-5
- Rivero, Z. I.; Rivero, R. E.; Rivero, R. R. & Pomares, I. 2013. "Escenarios climáticos para Camagüey como consecuencia de un conflicto nuclear de baja intensidad". III Congreso Internacional de Cambio Climático de la IX Convención Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, 8 - 12 Julio 2013, 17 pp. ISBN 978-959-300-034-5
- Robock, A. & Toon, O. B. 2010. "Local nuclear war, global suffering". *Scientific American*, January 2010, 74 - 81 pp.
- Robock, A., Oman, L. & Stenchikov, G. L. 2007a. "Nuclear winter revisited with a modern climate model and current nuclear arsenals: Still catastrophic consequences". *J. Geophys. Res.*, 112.
- Robock, A.; Oman, L.; Stenchikov, G. L.; Toon, O. B.; Bardeen, C. & Turco, R. P. 2007b. "Climatic consequences of regional nuclear conflicts". *Atm. Chem. Phys.*, 7, 2003-2012 pp.
- Schröder, W., G. Schmidt, G. & Schönrock, S. 2014. *Modelling and mapping of plant phenological stages as bio-meteorological indicators for climate change*. Landscape Ecology, University of Vechta, Springer Nature, 24 pp.

- Toon, O. B., A. Robock and R. P. Turco (2008): “Environmental consequences of nuclear war”. *Physics Today*, Vol. 61, No. 12, 37 – 42 pp.
- Turco, R. P., O. B. Toon, T. P. Ackerman, J. B. Pollack and C. Sagan (1984): “Global Atmospheric Consequences of Nuclear War”. *Science*, Vol. 222, 1283 – 92 pp.
- Velikhov, Y. (ed.). 1985. *The night after: Climatic and biological consequences of a nuclear war*. Mir Publishers, Moscow, 165p.
- Wolf, J. & Diepen, C. A. van.1993. “Effects of climate change on crop production and land use in the Rhine basin”. In *Climate Change: crops and terrestrial ecosystems* (S. C. van de Geijn, J. Goudriaan and F. Berendse, eds). *Agrobiologische Thema's* 9, 71-75 pp.
- Xia, L. & Robock, A. 2013. “Impacts of a nuclear war in South Asia on rice production in Mainland China”. *Climatic Change* 116: 357–372 pp.