



AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
<http://ageconsearch.umn.edu>
aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*


Modelos de impacto en la agricultura teniendo en cuenta los escenarios de la agricultura del cambio climático



Impact models in agriculture taking into account the scenarios of agriculture of climate change

Vázquez Montenegro, Ranses José; Durán Zarabozo, Odil; Baca, Marcio; Editor Académico Prof. Dr. Carlos A. Zuniga González

Ranses José Vázquez Montenegro
ranses.vazquez@insmet.cu
Instituto de Meteorología de Cuba, Cuba

 Odil Durán Zarabozo
odil@ceniai.inf.cu
Instituto de Geografía Tropical, Cuba

Marcio Baca
marcio.baca@met.ineter.gob.ni
Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales,
Nicaragua

Editor Académico Prof. Dr. Carlos A. Zuniga
González
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León,
Nicaragua

Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua
ISSN-e: 2410-7980
Periodicidad: Semestral
vol. 1, núm. 1, 2015
czuniga@ct.unanleon.edu.ni

Recepción: 10 Septiembre 2014
Aprobación: 15 Diciembre 2014

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/394/3941748006/>

DOI: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v1i1.2140>

Autor de correspondencia: ranses.vazquez@insmet.cu

Resumen: La presente reseña o recopilación de estudios realizados en Cuba y Nicaragua, tiene como propósito examinar, los impactos potenciales del cambio climático sobre el sector agropecuario mediante el uso de la modelación, con el fin de brindar elementos que puedan tomarse en cuenta para la formulación de políticas agropecuarias y ambientales, ya que conocer los posibles impactos del cambio climático, es un primer paso hacia la acción eficaz. Se analizan los posibles impactos de las variaciones de las variables climáticas sobre el sector agropecuario, sobre algunos de los cultivos más importantes. Asimismo se contabilizan los impactos económicos a través escenarios climáticos futuros. El estudio en el sector de agricultura arrojó una amplia gama de resultados que abarcan tanto consecuencias perjudiciales como beneficiosas, en función de que los niveles del efecto de fertilización por CO₂ (estimados en los laboratorios) se alcancen en la práctica para las plantas de ciclo fotosintético C₃.

Palabras clave: Cambio Climático, Modelos de análisis, Modelos empíricos.

Abstract: The purpose of this review or compilation of studies carried out in Cuba and Nicaragua is to examine the potential impacts of climate change on the agricultural sector through the use of modeling, in order to provide elements that can be taken into account for the formulation of agricultural and environmental policies, since knowing the possible impacts of climate change is a first step towards effective action. The possible impacts of variations in climatic variables on the agricultural sector, on some of the most important crops, are analyzed. Likewise, economic impacts are accounted for through future climate scenarios. The study in the agriculture sector yielded a wide range of results that cover both harmful and beneficial consequences, depending on whether the levels of the CO₂ fertilization effect (estimated in laboratories) are achieved in practice for the photosynthetic cycle plants. C₃.

Keywords: Climate change, Analysis models, Empirical models.

NOTAS DE AUTOR

ranses.vazquez@insmet.cu

PREFACIO RELATIVO A LA MODELACIÓN EN GENERAL

Modelos

El sistema agrícola es un sistema complejo que incluye muchas interacciones entre los factores bióticos y abióticos. Los animales y las cosechas son los componentes más importantes de este sistema. Las plantas integran muchas funciones biológicas, físicas y químicas que mantienen los mecanismos que garantizan el crecimiento, el desarrollo, la reproducción, la senescencia y la muerte. Las plantas actúan recíprocamente con muchos factores abióticos, sobre todo las variables del tiempo como la temperatura y la radiación solar, y variables del suelo, sobre todo la reserva de humedad productiva y los nutrientes. Además, las plantas actúan recíprocamente con los factores bióticos, incluyendo entre ellos a las plagas, las enfermedades y malas hierbas. Cada uno de estos organismos es en sí mismo un sistema complejo. Debido a las incertidumbres asociadas con muchas de estas variables, sobre todo las condiciones del tiempo, es muy difícil de determinar la respuesta global de este sistema. Es realmente sorprendente cómo los agricultores pueden manejar el ecosistema y económicamente sobrevivir, debido a las incertidumbres medioambientales así como las económicas debido a los riesgos de cultivo.

Debido a la complejidad de los sistemas de cultivo y de cosechas, los sistemas de análisis se usan para ayudar a entender los componentes individuales, así como la integración de estos componentes en el sistema global. Esto ha llevado al desarrollo de modelos computacionales de simulación. Los modelos son muy comunes en otras disciplinas, sobre todo en las ciencias de la ingeniería como la ingeniería aeroespacial y la ingeniería civil. Sin embargo, ellos todavía no han sido bien acogidos en las ciencias agrícolas, como en las otras ciencias, debido al carácter tradicional de los agricultores. Sin embargo, las cosas están cambiando rápidamente en la medida que se han ido introduciendo métodos y tecnologías de cultivo más precisas en los sistemas de cultivo moderno. Esa precisión que las tecnologías de cultivo requieren con los modelos computacionales y de otros sistemas de apoyo para la toma de decisiones está siendo informada a los agricultores.

Hay varios factores medioambientales que pueden ser modificados por los agricultores a través de la adaptación de sus prácticas de gestión. Sin embargo, el tiempo atmosférico es el factor dominante que controla la producción agrícola y determina los rendimientos finales de la cosecha. Los modelos de simulación de cosecha pueden jugar un papel importante al ayudar a entender el sistema agrícola y la interacción con las variables del tiempo y del clima. Los modelos de simulación de cosecha también pueden proveer las guías de gestión alternativa a los agricultores de acuerdo a los diferentes escenarios. Una de las revisiones más tempranas de los modelos de simulación de cosecha realizada en 1978 describe por lo menos tres planteamientos para elaborar modelos del impacto del tiempo meteorológico y el clima en el rendimiento de las cosechas:

- a) modelos de simulación del crecimiento de los cultivos que describen el impacto detallado de la variabilidad meteorológica en los procesos biológicos/físicos que se producen dentro de una planta típica o de un follaje típico;
- b) modelos de análisis cultivo tiempo meteorológico que constituyen un medio de investigación para analizar las reacciones del cultivo ante determinadas variables agro meteorológicas;
- c) modelos empírico estadísticos que utilizan una muestra de datos del rendimiento de las cosechas correspondiente a un área determinada y una muestra del tiempo meteorológico y de los datos del suelo procedentes de la misma zona, con objeto de producir estimaciones de los coeficientes del modelo, mediante una especie de técnica de regresión.

El planteamiento empírico estadístico se utiliza mayormente en las predicciones corrientes y operativas del rendimiento de las cosechas y en las predicciones de carácter nacional o regional.

La Escuela de De Wit ha definido cuatro niveles o fases de modelación para los diferentes rangos de producción potencial limitada por nutrientes y plagas. La literatura actual muestra que hay por lo menos 100 modelos de la simulación diferentes (Hoogenboom, 2000). El número mayor de modelos puede encontrarse

para el trigo, que es una de las cosechas alimenticias más importantes. Un número limitado de modelos existe para las demás formas de granos en los cereales, en los granos las leguminosas, las raíces y los tubérculos y especialmente en la cosecha de los vegetales y las frutas. Hay muchos otros cultivos para los cuales no se han desarrollado modelos de simulación de cosecha debido a la falta de recursos o interés.

DSSAT

Uno de los sistemas de modelación más extensamente usados en el mundo es el Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones y Transferencia de Agrotecnología (DSAAT). El DSSAT se desarrolló bajo los auspicios de un proyecto de la Red Internacional de Sitios Benchmark para la Transferencia de Agrotecnología (IBSNAT), apoyado por una concesión de la Agencia Americana para el Desarrollo Internacional a la Universidad de Hawai. El DSSAT consiste actualmente de

17 programas de simulación de la cosecha diferentes para distintos manejos, incluso la familia de cereales de grano de los modelos CERES para el maíz, trigo, mijo, el sorgo, la cebada y arroz y la familia de leguminosas de grano de los modelos CROPGRO, para la soya, maní, fríjol común, cowpea, y garbanzo. Otros modelos que son parte de DSSAT incluyen la papa del modelo SUBSTOR, la caña de azúcar del modelo CANEGRO, la yuca del modelo CROPSIM y el girasol del modelo OILCROP (Hoogenboom et al., 1999). El DSSAT se ha expuesto a muchos científicos y otras personas interesadas en los modelos de simulación de la cosecha, a través de entrenamientos en talleres y simposios. Estos talleres se han realizado en las diferentes universidades de EE.UU. así como en centros internacionales de investigaciones tales como el Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizante (IFDC) en Muscle Shoals, Alabama, el Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT) en México, y el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) en Filipinas. Como resultado, los modelos de simulación de cosecha DSSAT se han usado ampliamente para aplicaciones diferentes en muchas regiones del mundo (Tsuji et al., 1998).

Modelos de Wageningen

La familia de modelos SUCROS fue diseñada por el Centro de Investigaciones de la Universidad de Wageningen, de Holanda. Según Bouman et al. (1996) y Penning de Vries et al. (1989) esta familia de modelos ha sido ampliamente utilizada en el mundo. Por medio de la actividad de la Simulación y Análisis del Sistema para la Producción de Arroz (SARP) de un proyecto colaborativo con el IRRI apoyado por el gobierno holandés, el modelo ORYZA del arroz se probó extensivamente en el Sudeste de Asia (Kropff et al., 1994). Los modelos que son parte de la familia del modelo de gestión SUCROS incluyen los MACROS y BACROS y un modelo simplificado llamado WOFOST. El grupo de Wageningen ha enfatizado en la forma de cómo desarrollar nuevos modelos, programas y herramientas especiales que usan la simulación en el entrenamiento de las personas.

APSIM

El Sistema de Simulación de la Producción Agrícola (APSIM) se ha usado principalmente en Australia. Está desarrollándose por la Unidad de Investigaciones de Sistemas de Simulación de la Producción Agrícola (APSRU) y ha recibido un fuerte apoyo de la industria agrícola local (Meinke et al., 2000). Como resultado, una cantidad significativa de recursos financieros ha sido invertida en el desarrollo de modelos de interfaz de uso fácil. Esto ha dado más facilidades a los no modeladores, como agricultores y cosecheros para trabajar con APSIM y aplicar este modelo a sus condiciones locales (Keating et al., 1997; McCown et al., 1996).

Otros modelos de cultivo

El modelo Predictor de Erosión para el Cálculo de Impactos (EPIC) también se ha usado para las aplicaciones del cambio climático, sobre todo en EE.UU. (Jones et al., 1991) lo renombró recientemente como la Política Medioambiental Integrada al Clima. Sin embargo, el modelo EPIC fue desarrollado para estudiar los problemas de erosión originalmente y no el impacto de cambio del clima y variabilidad del clima en la producción agrícola. PLANTGRO, CENTURY y CropSyst son otros modelos muy conocidos de simulación de la cosecha (Cole et al., 1993)

GCTE

Existen muchos otros modelos de simulación de cosecha, en específico para una o más cosechas. El Global Change Terrestrial Ecosystem (GCTE) ha intentado desarrollar varias redes en que pueden participar los modeladores de la cosecha así como los colectores de los datos. Hasta ahora la red del trigo ha sido la más exitosa; ha producido varias publicaciones, incluso una lista de 19 modelos para el trigo, así como una comparación extensa de diferentes modelos de trigo. Existen redes adicionales para el arroz y la papa, con planes tentativos para los cereales tropicales, granos de leguminosas y yuca.

Plagas y enfermedades

La mayoría de los modelos y sistemas de modelación simulan la producción potencial con limitaciones de agua y de nitrógeno. La limitación de fósforo en la producción potencial se está agregando a las modelos que forman parte del sistema DSSAT, así como APSIM. El modelo CROPGRO, para los granos de leguminosas también incluye una opción para simular el impacto de las plagas y enfermedades. CROPGRO puede analizar más de 20 plagas que acopla puntos que vinculan el daño de la plaga a determinadas tasas y variables de estado. El daño de la plaga es aplicado desde archivos de datos externos que pueden incluir informes de daños. GCTE está llevando algunas actividades que incluirán la vinculación de los modelos dinámicos de plagas con los modelos de simulación de la cosecha para poder simular los efectos interactivos entre las plagas y cosechas.

Datos normalizados

Durante los últimos 10 años ha incrementado el interés en la aplicación de modelos de simulación de la cosecha, incluyendo el cambio climático global así como la variabilidad del clima global. Las interfaces para los modelos de simulación de la cosecha también se han simplificado, facilitando, de esta forma, su utilización y aplicación a los usuarios que no diseñaron los modelos. Para estas aplicaciones es necesario evaluar los resultados de los modelos con los datos locales para establecer la credibilidad del resultado esperado. Como el número de modelos de simulación está disminuyendo lentamente, es importante agrupar y estandarizar los formatos de entrada y salida de los modelos, así como, módulos en vías de desarrollo que pueden intercambiarse entre los grupos de modelación. El Consorcio Internacional para las Aplicaciones del Sistema Agrícola (ICASA) ha estado a la vanguardia en la normalización de los datos en vías de desarrollo para los modelos de simulación de la cosecha y ha mantenido un foro para el intercambio de información entre los modeladores. ICASA actualmente incluye la participación del grupo modelador APSRU, del grupo modelador Wageningen y del grupo modelador DSSAT. Pueden encontrarse las guías para un nuevo juego de entrada y salidas normalizadas para la próxima generación de modelos de simulación de la cosecha en el sitio web de ICASA.

Aunque hay muchos tipos diferentes de usuarios de los modelos, pasando por científicos, educadores, extensionistas, tomadores de decisiones, consultores, y agricultores, el objetivo final es poder operar fácilmente el sistema. La meta de los usuarios es poder desarrollar alternativas de gestión para los diferentes escenarios que ayuden a cubrir los problemas de su mundo real, para mejorar la producción agrícola y la gestión de los recursos naturales, así como reducir la contaminación ambiental. Se espera que la aplicación de los modelos de simulación de la cosecha se extiendan rápidamente en el futuro cercano y que los agricultores e investigadores, juntos, apoyados en la uso de la computación puedan gestionar la información agrícola y medioambiental para que los resultados de los modelos estén disponibles más rápidamente en el campo, la granja y el nivel regional.

De las predicciones agras meteorológicas actualmente en uso, la más importante desde el punto de vista económico es probablemente la predicción agro meteorológica del rendimiento de las cosechas. La evolución de estos métodos ha hecho tan rápidos avances en las últimas décadas que los agro meteorólogos los han aplicado a los principales cultivos en numerosos países. Entre los países más avanzados que utilizan la predicción del rendimiento de las cosechas figuran Canadá, Alemania, Rusia, India, Japón, Estados Unidos de América. La mayoría de las predicciones operativas del rendimiento de las cosechas han sido establecidas para los cultivos anuales de cereales debido a su principal función en la producción alimentaria mundial y también por su importancia económica en el comercio internacional.

El cambio climático representa una seria amenaza para las sociedades centroamericanas y caribeñas por sus múltiples impactos previstos en la población y en los sectores productivos. Se estima que para 2030 en la región se producirá menos de 0,5% de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) del planeta, pero al mismo tiempo ya es una de las regiones más vulnerables ante los embates del cambio climático.

El incremento de la temperatura atmosférica y del mar, la reducción y la inestabilidad del régimen de lluvias y el aumento del nivel del mar, aunado a la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos —como las sequías y los huracanes— impactarán en la producción, la infraestructura, los medios de vida, la salud y la seguridad de la población, además de que debilitarán la capacidad del ambiente para proveer recursos y servicios vitales.

En el análisis de los impactos del cambio climático sobre la actividad económica, la agricultura por su importancia como proveedora de alimentos a la población es de los primeros sectores económicos en ser considerados debido a su alta dependencia y sensibilidad a los cambios climáticos.

En años futuros, es muy probable que el cambio climático traerá como consecuencia que los niveles de precipitación y temperatura se modifiquen, al mismo tiempo los fenómenos climáticos extremos aumentarán su frecuencia e intensidad. Incrementos en la temperatura pueden tener efectos positivos o negativos en los rendimientos de los cultivos, dependiendo de la magnitud y del tipo de cultivo. En regiones frías se podría incrementar el rendimiento de ciertos cultivos y propiciar la inserción de otros, no obstante en regiones cálidas los rendimientos podrían disminuir. Sin embargo, los efectos positivos pueden revertirse si la temperatura aumenta en demasía. Por su parte, aumentos en la precipitación puede beneficiar a regiones áridas, pero disminuciones en a misma podrían agravar los problemas. En su conjunto estos eventos pueden poner en riesgo el suministro de alimentos a nivel mundial y el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio.

La presente reseña o recopilación de estudios realizados en Cuba y Nicaragua, tiene como propósito examinar, los impactos potenciales del cambio climático sobre el sector agropecuario mediante el uso de la modelación, con el fin de brindar elementos que puedan tomarse en cuenta para la formulación de políticas agropecuarias y ambientales, ya que conocer los posibles impactos del cambio climático, es un primer paso hacia la acción eficaz.

Se analizan los posibles impactos de las variaciones de las variables climáticas sobre el sector agropecuario, sobre algunos de los cultivos más importantes. Asimismo se contabilizan los impactos económicos a través escenarios climáticos futuros.

CUBA

Resumen

El presente trabajo ofrece la primera aproximación a la valoración de los posibles impactos del cambio climático sobre el sector agrícola (cañero y no cañero) que fue realizada en el marco de la Primera Comunicación Nacional de Cuba a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Centella, Llanes y Paz, 2001), a partir de las proyecciones climáticas obtenidas empleando el modelo HADCM2 para diferentes niveles de sensibilidad climática, mientras que los elementos considerados para evaluar los impactos del cambio climático en la agricultura fueron los rendimientos agrícolas; la producción total de los cultivos; la biomasa aérea de los pastos y las plagas. En general, un análisis de los resultados alcanzados indicó que: La evaluación de los rendimientos agrícolas considerando un conjunto de cultivos dependió notablemente de la ocurrencia o no del efecto de fertilización por CO₂ y de la sensibilidad climática considerada. De no producirse el efecto de fertilización, los rendimientos agrícolas potenciales y de regadío de todos los cultivos disminuirían progresivamente en magnitudes que oscilarían entre 10-15 % de los valores actuales; para la caña de azúcar las reducciones serían menores (5-10 %), mientras que en la papa la disminución sería notable (40-45 %). Si el efecto de fertilización se producía, los impactos se modificarían

drásticamente, llegando a existir la posibilidad que cultivos C3 de clima cálido y ciclo corto (frijol, soya y arroz) elevaran sus rendimientos, a pesar que en la papa estos seguirían disminuyendo.

INTRODUCCIÓN

El clima de Cuba, se ha caracterizado en los últimos años por un ascenso progresivo de las temperaturas mínimas y medias, siendo más notable durante el período invernal y en la mitad nocturna del día, y acompañado por una reducción de la oscilación térmica diaria (Centella et al., 1997). Este fenómeno, ha sido más pronunciado desde mediados de la década del 70. Las tendencias observadas en el clima de Cuba (Lapinel et al., 1993 y Centella et al., 1997) han ejercido un impacto negativo sobre la actividad agrícola, los bosques y los recursos hídricos de que se dispone para el riego, constituyendo un factor adicional de estrés a la situación de deforestación y de degradación progresiva de los suelos.

El ascenso general apreciado en las temperaturas ha estado acompañado de una reducción del total de precipitaciones anuales del 10-20% y un aumento de la variabilidad interanual del 5- 10%, con la característica de que las lluvias han estado disminuyendo en el período lluvioso del año (desde mayo hasta octubre) y han aumentado en el período poco lluvioso (Lapinel et al., 1993).

En la realización de la presente evaluación se utilizaron los métodos recomendados en UNEP/IES (1996) y USCSP (1994). Esto permitirá ofrecer una mejor valoración de la situación a las autoridades nacionales que tomarán las decisiones correspondientes de adaptación al cambio climático, contribuyendo a conformar una visión más completa de las consecuencias esperadas de ese cambio y de las medidas que deben adoptarse para reducir los impactos negativos que se deriven del mismo. Tal evaluación tiene una importancia primordial para un país como Cuba, el cual posee una larga tradición agrícola, y para el que la agricultura significa una actividad de peso considerable como fuente de alimentos para el consumo de la población y de producción de recursos exportables.

Los objetivos principales a alcanzar en dicha evaluación

- Determinar la evolución futura del clima de Cuba, no sólo en lo relativo a las variables climáticas más comunes, sino también a las variables indirectas como son: los términos del balance de radiación e hídrico y los índices climáticos principales, que caracterizan la respuesta de los ecosistemas naturales y agrícolas al medio ambiente físico.

- Evaluar la respuesta de los ecosistemas de bosques a las nuevas condiciones impuestas por el cambio climático.

- Estimar la respuesta al cambio climático de los principales cultivos cubanos (en base a los rendimientos potenciales) en condiciones de regadío y de secano, y valorar el impacto sobre: sus necesidades de agua de riego, las malas hierbas y las principales plagas y enfermedades que les afectan.

- Elaborar las bases de una futura estrategia de adaptación al cambio climático que permita reducir las consecuencias negativas sobre la producción de alimentos para el consumo de la población, la exportación de productos agrícolas, la degradación de los suelos y las condiciones de vida de la población.

- Realizar una modesta contribución a la elucidación de estos fenómenos para la comunidad internacional, permitiendo así la elaboración de programas nacionales, regionales y mundiales que garanticen la seguridad alimentaria del género humano en las nuevas condiciones climáticas.

- Dotar a los estadistas y dirigentes estatales de los elementos mínimos necesarios para la toma de decisiones tácticas y estratégicas en el campo del desarrollo agrícola de la nación.

La metodología y los resultados mostrados son solo una parte del trabajo “Primera Comunicación Nacional de Cuba a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (Centella, Llanes

y Paz, 2001), en especial de su capítulo 5to y que conto con la autoría de: Roger E. Rivero, CMC; Guadalupe Gómez, IISV; Arnaldo Alvarez, IIF; Roger R. Rivero, CMC; Dositeo R. García, CMC; Ignacio Martínez, CMC; Manuel Sánchez, IIF; Santiago Jiménez, IISV; Angel Porras, IISV; José Cortinas, IISV; Liudmila Llanes, IISV; Ciro Milián, IIF y Leyla Alvarez, IIF. [CMC: Centro Meteorológico de Camagüey; IISV: Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal; IIF: Instituto de Investigaciones Forestales; IIF: Instituto de Investigaciones Hortícolas “Liliana Dimitrova”].

Metodología para la evaluación de los impactos del cambio climático.

Para evaluar los impactos del cambio climático, el sector de agricultura y silvicultura fue subdividido en tres subsectores, a saber: Los cultivos agrícolas; las plagas y enfermedades de los cultivos; y los bosques y plantaciones forestales. Esta división responde al hecho de que tanto los métodos de análisis, los datos necesarios y el alcance espacial de los resultados, fueron diferentes en cada caso.

Cultivos agrícolas. Para la evaluación del impacto de los cambios climáticos sobre los rendimientos agrícolas se requiere generalmente de una base de datos diarios para un conjunto de variables climáticas mayor que la usada generalmente en otros sectores (Benioff et al., 1996). Este hecho redujo bastante el número de regiones agrícolas que podían ser estudiadas.

Atendiendo a esto, las áreas de estudio fueron seleccionadas considerando diferentes elementos que permitieran la extrapolación de los resultados a otras regiones del país. De este modo, la región que será estudiada es la formada por la zona central de las provincias Camagüey, Las Tunas y Holguín. Esta región es eminentemente agrícola y representa una porción considerable de la producción nacional de sacarosa, carne y leche. Otras actividades agrícolas que poseen magnitudes importantes están relacionadas con el cultivo de plátano, cítricos, arroz, papa y maíz, encontrándose en desarrollo nuevas áreas de cultivos como la soya, el millo y el sorgo. Esta zona posee un clima de transición entre la zona occidental, más húmeda, y la oriental donde existen condiciones de aridez más marcadas y áreas de clima semidesértico.

Marco temporal del estudio. El marco temporal del presente estudio fue elegido de modo tal que pudiese satisfacer las necesidades que tienen los diversos niveles estatales y de gobierno de tener elementos para la toma de decisiones, tanto en los momentos actuales en que el clima está siendo un importante factor en los resultados de la producción agrícola, como a corto mediano y largo plazo.

Los resultados para el clima de referencia (línea base climática), especialmente en lo relativo a la evaluación cuantitativa de los rendimientos agrícolas, son obtenidos por primera vez en Cuba con el uso de modelos biofísicos avanzados y constituyen elementos orientadores de la agricultura actual. Para permitir la toma de decisiones y la elaboración de políticas relativas al desarrollo inmediato y prospectivo de la agricultura, las evaluaciones realizadas para los años 2010 y 2030 suministran el panorama general requerido, mientras que las evaluaciones a largo plazo para el 2050 y 2100 permiten proyectar cuales podrían ser los impactos sobre el sector.

Línea base y escenarios de cambio climático. Línea base climática En el estudio del subsector de cultivos agrícolas se utilizaron los datos climáticos correspondientes a la Estación Meteorológica 355 (Camagüey), ubicada en 21°24' N y 77°52' O. Esta estación puede considerarse representativa de las llanuras centrales de la región centro - oriental del territorio y es una estación de intercambio mundial con registros ininterrumpidos desde 1948. Los datos climáticos utilizados fueron las medias diarias de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa media y humedad relativa mínima de la estación de Güira de Melena, provincia La Habana, para los meses de diciembre, enero y febrero desde 1978 hasta 1994.

Escenarios de cambio climático. Para evaluar los impactos del cambio climático sobre la agricultura se tomaron en consideración escenarios climáticos y de elevación del nivel de mar. En el caso de los cultivos agrícolas se tomaron en cuenta solamente las proyecciones realizadas con el modelo HADCM2, pues sus salidas eran las únicas que incluían todas las variables necesarias para ejecutar los modelos biofísicos.

Empleando las estimaciones futuras del HADCM2, fueron calculados, además, varios parámetros relevantes del balance de radiación y del balance hídrico, con la finalidad de que el escenario climático considerara también estos elementos que son muy relevantes a la hora de analizar los efectos del clima sobre la vegetación.

Para realizar el cálculo de los parámetros antes mencionados se utilizó la formulación propuesta por Budyko (Sellers, 1970), mediante un modelo climático simplificado elaborado por los autores, el cual utiliza la línea base climática.

Los parámetros estimados fueron: el balance de radiación (R0) en Kcal /cm² - año, la evapotranspiración potencial de referencia (E0) en mm / año y la evapotranspiración real (E) de los ecosistemas.

Las ecuaciones utilizadas fueron: $R0 = 3.65 T_m$ (1) $E0 = 62.05 T_m$ (2) $E = P [K (1 - \cosh K + \sinh K) \tanh (1/K)]^{1/2}$ (3)

donde: T_m temperatura media anual (°C); P precipitación media anual (mm); K índice radiativo de aridez de Budyko - Lettau (Hare, 1985) que se calcula por: $K = 10 R0 / 0.59 P$ (4)

La estimación indirecta de los términos del balance hídrico, se realizó mediante la ecuación correspondiente,

$$W2 = P + W1 - E - S \quad (5)$$

donde: $W1$, $W2$ contenido de agua del suelo al comienzo y final del período analizado (mm) y S escorrentía (mm).

Métodos utilizados en la evaluación.

Rendimientos agrícolas. Uno de los modelos utilizados en la evaluación de los impactos sobre los rendimientos agrícolas fue el modelo biofísico WOFOST versión 4.1 (Diepen et al., 1988). Esta versión del modelo no incluye una parametrización implícita del efecto fisiológico directo de la concentración atmosférica del dióxido de carbono sobre la eficiencia fotosintética y el uso del agua por los cultivos.

Los ensayos realizados modificando externamente los parámetros genéticos relacionados con la intensidad de la fotosíntesis y de la transpiración de los cultivos, según los valores recomendados por Wolf y Diepen (1993), demostraron que en el caso de los cultivos con ciclo fotosintético C3 la inclusión ó no del efecto fisiológico directo del CO₂ podía revertir por completo los impactos negativos del cambio climático sobre los rendimientos potenciales (Rivero y Rivero, 1998c).

Para estudiar de modo más completo la influencia de ese factor, se decidió utilizar los modelos biofísicos incluidos en la versión 3.0 del sistema DSSAT y denominados en la literatura como modelos ICASA/IBSNAT (UNEP/IES, 1996). Estos modelos han sido ampliamente utilizados para la evaluación del impacto de los cambios climáticos en otros países (Benioff et al., 1996).

Para el caso de la caña de azúcar se utilizó el modelo CANEGRO 3.1, que aunque no está incluido inicialmente en el sistema DSSAT, fue preparado para ello por sus autores (Kiker e Inman - Bamber, 1996).

Los modelos biofísicos fueron utilizados para estimar los rendimientos agrícolas potenciales, de regadío y de secano de los cultivos seleccionados.

Los rendimientos agrícolas de regadío se designan aquí como los que se obtendrían en un suelo arcilloso típico para un cultivo con todas sus necesidades hídricas satisfechas, mediante un sistema de riego automático por aspersión, en las condiciones climáticas de la localidad elegida y excluyendo la presencia de carencias nutricionales, plagas y enfermedades.

Los rendimientos agrícolas de regadío son sensiblemente iguales a los rendimientos potenciales, pero las simulaciones numéricas realizadas en estas condiciones permitieron estudiar el impacto del cambio climático sobre la evapotranspiración total durante el ciclo de cultivo y las necesidades de agua de riego. Los rendimientos agrícolas de regadío son, al igual que los rendimientos potenciales, básicamente dependientes de las temperaturas y los niveles de radiación solar fotosintética, ocurriendo lo mismo con la evapotranspiración

total del cultivo. Sin embargo, las necesidades de agua de riego sí son fuertemente dependientes del régimen de precipitaciones y por lo tanto, el uso de modelos climáticos globales con proyecciones distintas en este régimen podría conducir a comportamientos muy diferentes en las tendencias de la necesidad total de agua de riego durante el próximo siglo.

Los rendimientos agrícolas de secano son aquellos que se obtendrían en un suelo arcilloso típico, para un cultivo sin carencias nutricionales, libre de plagas y enfermedades, con las condiciones de temperatura, radiación solar fotosintética y precipitación previstas para la localidad en cuestión.

Estos rendimientos de secano resultan altamente dependientes del escenario climático y los modelos globales utilizados, así como de la época de siembra dentro de un mismo escenario. La variabilidad de estos rendimientos puede ser muy alta y llega alcanzar valores extremos que van desde cero hasta magnitudes cercanas a los rendimientos potenciales y de regadío, al igual que sucede con la evapotranspiración total del cultivo.

En todos los casos en que fue posible, los rendimientos potenciales, de secano y de regadío, así como el resto de los parámetros estudiados, fueron obtenidos considerando o no el efecto de fertilización por CO₂. Los resultados demostraron que la inclusión de este efecto puede modificar drásticamente las tendencias futuras de los rendimientos agrícolas de todo tipo, para los cultivos C3 de clima cálido así como de la necesidad de agua de regadío y la evapotranspiración total para los cultivos C4 (Rivero y Rivero, 1998c).

Todas las simulaciones numéricas hechas para estimar el comportamiento de los cultivos agrícolas considerando el efecto de fertilización por CO₂ ó no, fueron realizadas empleando las series climáticas de 30 años correspondientes a 1961-90 de la estación meteorológica 355 (Camagüey) y las generadas para el 2010, 2030, 2050 y 2100 mediante los escenarios de emisión IS92a y KYOTOA1, con sensibilidad media y alta, usando el modelo de circulación general HadCM2 (Hadley Center, 1995).

Resultados de la evaluación de impactos.

El estudio en el sector de agricultura arrojó una amplia gama de resultados que abarcan tanto consecuencias perjudiciales como beneficiosas, en función de que los niveles del efecto de fertilización por CO₂ (estimados en los laboratorios) se alcancen en la práctica para las plantas de ciclo fotosintético C3. Estos resultados son discutidos en los siguientes epígrafes.

Rendimientos agrícolas. En esta evaluación se estudió el impacto de los cambios climáticos sobre los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.), frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), soya (*Glycine maximum* (L.) Merr.), yuca (*Manihot esculenta* Crantz), arroz (*Oryza Sativa* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), maíz (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), millo perla (*Pennisetum americanus* (L.) Leeke) y caupí (*Vigna unguiculata*).

Con ese fin se analizaron los rendimientos potenciales, de regadío y de secano de estos cultivos, así como el comportamiento de su evapotranspiración total y necesidades de agua de riego para alcanzar sus rendimientos potenciales. Siempre que fue necesario, se tomó en cuenta la duración total del ciclo del cultivo, como sucede con los cultivos de ciclo determinado, y en casos especiales, como la papa, se analizó la duración del período que media entre las fases de germinación y la de comienzo de la tuberización. Los parámetros de rendimiento se obtuvieron incluyendo o no, el efecto de fertilización por CO₂. Esto no fue posible en el caso de la yuca y el caupí, debido a que los modelos disponibles no poseen parametrizaciones implícitas de este efecto sobre la fisiología del cultivo.

Resultados obtenidos sin la inclusión del efecto de fertilización por CO₂.

Los resultados demuestran que, sin la inclusión del efecto de fertilización por CO₂, los rendimientos potenciales de todos los cultivos estudiados decrecen (Tabla 1). En general, esto indica que el incremento de la temperatura no favorece el proceso de formación de materia seca en el órgano de almacenamiento de las plantas el cual constituye su principal producto agrícola aprovechable.

El impacto negativo de la elevación de las temperaturas proviene, en primera instancia, de un balance de biomasa desfavorable entre los procesos fotosintéticos y respiratorios. Sin embargo, en algunos casos resultan más evidentes otros tipos de interacciones las cuales modifican el desarrollo fenológico de las plantas, la duración total del ciclo de cultivo y el proceso de asignación de materia seca a los diversos órganos de la planta que es controlado por las llamadas funciones logísticas

Tabla 1. Rendimientos agrícolas potenciales y de regadío esperados, en materia seca, para los escenarios climáticos utilizados sin inclusión del CO₂ (Mg/ha).

TABLA 1.
Rendimientos agrícolas potenciales y de regadío esperados, en materia seca,
para los escenarios climáticos utilizados sin inclusión del CO₂ (Mg/ha).

CULTIVO	ALCANCE TEMPORAL				
	ACTUAL	2010	2030	2050	2100
Papa	12.342	11.541	10.676	9.567	6.437
Soya	3.468	3.350	3.253	3.129	2.799
Frijol	2.917	2.870	2.841	2.773	2.612
Arroz ⁽¹⁾	12.047	11.718	11.442	11.162	10.696
Arroz ⁽²⁾	14.490	14.027	13.781	13.543	12.868
Yuca ⁽¹⁾	16.562	16.410	16.208	15.837	13.988
Yuca ⁽²⁾	13.449	13.294	13.115	12.811	11.160
Maíz	12.823	12.125	11.772	11.268	10.087
Sorgo	7.374	7.142	6.936	6.737	6.381
Millo perla	10.100	9.549	9.099	8.688	8.101
Caña de azúcar ⁽¹⁾	76.456	75.479	74.420	73.102	69.845
Caña de azúcar ⁽²⁾	72.114	71.883	71.154	70.281	68.166

Leyenda: (1) Siembra de primavera; (2) Siembra de frío

Tabla 1.

El impacto negativo de la elevación de las temperaturas proviene, en primera instancia, de un balance de biomasa desfavorable entre los procesos fotosintéticos y respiratorios. Sin embargo, en algunos casos resultan más evidentes otros tipos de interacciones las cuales modifican el desarrollo fenológico de las plantas, la duración total del ciclo de cultivo y el proceso de asignación de materia seca a los diversos órganos de la planta que es controlado por las llamadas funciones logísticas.

En el caso de la papa, que es un cultivo indeterminado cuyo ciclo de producción en Cuba fue prefijado en 90 días, la elevación de las temperaturas condiciona un retraso progresivo en el comienzo de la fase de tuberización. De esta forma disminuye el lapso de tiempo disponible para la acumulación de materia seca en el tubérculo, lo que conduce finalmente a una caída de los rendimientos potenciales. Para los cultivos y cultivares de hábito determinado como el arroz, maíz, sorgo y millo perla, se detecta un acortamiento progresivo de la duración total del ciclo de cultivo y del período de formación y llenado del grano. Todo esto conduce al descenso de los rendimientos.

Por otra parte, el descenso de los rendimientos potenciales de un cultivo no implica necesariamente una disminución equivalente de los rendimientos reales. Esto ocurre porque los rendimientos reales están determinados no sólo por las condiciones climáticas y la variedad utilizada, sino también por la tecnología disponible en la agricultura y la disciplina tecnológica que se alcanza.

A su vez, los rendimientos con regadío producen valores sensiblemente iguales a los potenciales. Los resultados del modelo de balance hídrico acoplado a los cultivos, demuestran que la evapotranspiración total disminuye en todos los escenarios, para los cultivos con ciclo fotosintético C4 de hábito determinado como el millo perla, el sorgo y el maíz, así como ocurre para algunos cultivos C3 de hábito determinado como el arroz de frío. Por el contrario, aumenta en general para los C3 y C4 de hábito indeterminado, como caña de frío, la soya, el frijol, la yuca y la papa. No obstante lo anterior, estas conclusiones no poseen el mismo grado de generalidad que la relativa a los rendimientos, pues de acuerdo a la sensibilidad (media ó alta) utilizada en el escenario y a la época de siembra, la evapotranspiración total puede aumentar en todos los escenarios.

Las necesidades de agua de riego decrecen en todos los escenarios para el arroz de frío, el millo perla y el frijol, mientras que crecen para el arroz de primavera, el sorgo, la soya, la yuca, la caña de azúcar y la papa.

Las conclusiones relativas al comportamiento de los volúmenes de agua de regadío necesarios para alcanzar los rendimientos potenciales carecen de generalidad. Esto se debe a que las mismas dependen fuertemente de si aumentan o disminuyen las precipitaciones de la época de siembra para los cultivos de ciclo corto y de la magnitud relativa de caída de los rendimientos y del acortamiento del ciclo de cultivo. Para los cultivos de ciclo largo, con fecha de siembra y cosecha preestablecida como la yuca y la caña de azúcar, las necesidades de agua de riego aumentan en todos los escenarios.

Los rendimientos en condiciones de secano sólo fueron estudiados para la caña de azúcar, el millo perla, el sorgo, la soya, el frijol, el maíz, el arroz y la yuca pues cultivos como la papa solo se siembran extensamente en Cuba con condiciones de regadío intensivo.

Los rendimientos de los cultivos estudiados en condiciones de secano, por lo general, decrecen sistemáticamente a lo largo del siglo venidero, pues a todos los factores ya mencionados se unen el aumento de la evapotranspiración potencial y la disminución de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Tabla 2). Esto crea condiciones desfavorables para los tenores de humedad del suelo y para la obtención de una fracción considerable del rendimiento potencial, ya que esta es proporcional al cociente entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración máxima del cultivo (Doorenbos y Kassam, 1988), siendo esta última proporcional a la evapotranspiración potencial. Se diferencia el caso del frijol, pues para la fecha de siembra seleccionada, su ciclo incluye los meses de noviembre, diciembre y enero para los cuales las proyecciones indican un incremento de las precipitaciones. En general puede observarse que el ritmo de este decrecimiento progresivo de los rendimientos de secano es más rápido que el de los rendimientos potenciales y de regadío.

Tabla 2. Rendimientos agrícolas de secano, en materia seca, para los escenarios climáticos utilizados sin inclusión del CO2 (Mg / ha).

TABLA 2.
Rendimientos agrícolas de secano, en materia seca, para los
escenarios climáticos utilizados sin inclusión del CO2 (Mg / ha).

CULTIVO	ALCANCE TEMPORAL				
	ACTUAL	2010	2030	2050	2100
Frijol	1.041	1.039	1.042	1.034	1.005
Arroz ⁽¹⁾	9.418	8.961	8.612	8.113	6.886
Arroz ⁽²⁾	3.887	3.552	3.348	3.191	2.684
Yuca ⁽¹⁾	13.725	13.639	13.539	13.342	11.994
Yuca ⁽²⁾	12.189	12.030	11.879	11.587	10.062
Maíz	12.678	11.936	11.598	11.094	9.795
Sorgo	7.366	7.132	6.922	6.715	6.316
Millo perla	9.619	9.090	8.598	8.120	7.238
Caña de azúcar ⁽¹⁾	60.093	58.116	55.914	52.870	44.709
Caña de azúcar ⁽²⁾	55.489	54.774	53.430	51.493	45.270

Legenda: (1) Siembra de primavera; (2) Siembra de frío

Tabla 2.

La evapotranspiración total decrece de modo sistemático para la yuca, el sorgo, el millo y la caña de azúcar pero crece para la soya. El maíz resulta un caso particular pues su evapotranspiración total decrece hasta mediados del siglo y aumenta después hasta alcanzar niveles semejantes a los del clima de referencia (línea base).

Las precipitaciones totales durante el ciclo del cultivo disminuyeron en todos los casos y escenarios previstos, porque estos son de ciclo largo o fueron sembrados en primavera donde el modelo climático global HadCM2 prevé una reducción de las lluvias. De haberse usado fechas de siembra hacia el último trimestre del año, hubiese podido ocurrir lo contrario en los cultivos de ciclo corto dado el aumento proyectado de las precipitaciones en noviembre - enero.

En general, las tendencias en los términos estudiados del balance hídrico son mucho más complicadas que las de los rendimientos pues dependen de la época de siembra y de la sensibilidad utilizada en los escenarios. Esto último se refleja en los ritmos de variación de las temperaturas y las precipitaciones, y por lo tanto en el de la evapotranspiración potencial y real, así como en los del resto de los términos del balance hídrico.

Resultados obtenidos con inclusión del efecto de fertilización por CO₂.

Los experimentos realizados a nivel de laboratorio dan como resultado que el aumento de la concentración de CO₂ produce un incremento considerable de la intensidad de la fotosíntesis en los cultivos con ciclo fotosintético C₃, así como una elevación notable de la eficiencia en el uso del agua por los cultivos con ciclo fotosintético C₄. El efecto de fertilización por CO₂ ocasiona una diversificación en la respuesta de las plantas al cambio climático ya que, en dependencia de la magnitud relativa de los cambios climáticos y de la concentración de CO₂, un mismo cultivo puede reaccionar aumentando ó disminuyendo sus rendimientos agrícolas.

El efecto del CO₂ permite distinguir por su comportamiento los cultivos C₃ de clima templado como la papa, los cultivos C₃ de clima cálido como el arroz, la soya y el frijol, y los cultivos C₄ de hábito determinado como el maíz, el sorgo, y el millo perla. La caña de azúcar, que es una planta C₄ de hábito indeterminado, presenta un comportamiento particular. El impacto negativo del cambio climático sobre la papa es tal, que la inclusión del efecto directo del CO₂ no logra revertir la tendencia decreciente de los rendimientos potenciales y de regadío. Los coeficientes de variación de los rendimientos crecen a lo largo del siglo y llegan a alcanzar valores tan altos, que no permitirán cultivar papa con una perspectiva mínima de éxito, de no mediar un sistema perfecto de pronóstico estacional.

En estas condiciones ocurre una disminución progresiva de la evapotranspiración total del cultivo y de las necesidades de agua de riego. Esto último estará dado, en parte, por el aumento de las precipitaciones durante el invierno.

Sin embargo, el aumento notable de las precipitaciones en noviembre - enero hará aún mucho más compleja la tarea de preparación de tierras, lo que ya constituye un problema en el clima actual y amenaza con desplazar el ciclo de cultivo hacia comienzos de año. Todo ello haría sufrir a la planta los valores más elevados de la temperatura que se producen en marzo y abril.

Para los cultivos C₃ de clima cálido como el frijol, la soya y el arroz, el efecto de fertilización por CO₂ logra revertir la tendencia decreciente de los rendimientos potenciales y de regadío, por lo que estos aumentan a lo largo del próximo siglo en vez de decrecer.

Ese efecto, sin embargo, es dependiente de la relación que tenga entre la sensibilidad del clima y la concentración de CO₂. Si la sensibilidad es baja, el efecto de fertilización logra revertir la tendencia decreciente de los rendimientos, pero si la sensibilidad es alta entonces pueden aparecer comportamientos erráticos, ocasionando que los rendimientos crezcan hasta mediados del siglo y decrezcan después.

La evapotranspiración total crece durante el próximo siglo para el arroz de primavera, la soya y el frijol, aunque más lentamente que sin incluir el efecto de CO₂, pero decrece para el arroz de frío. Las necesidades de agua de riego crecen o decrecen según la época de siembra.

Los rendimientos de secano del arroz, la soya y el frijol aumentan en todos los escenarios, denotando así el impacto positivo del efecto de fertilización por CO₂.

A pesar del efecto de fertilización por CO₂, los rendimientos potenciales y de regadío de los cultivos C₄ con hábito determinado, como el maíz, el sorgo y el millo perla, decrecen progresivamente con el tiempo en los escenarios previstos. Sin embargo, este decrecimiento es más lento que en el caso de que tal efecto no se produzca. En estos cultivos el proceso de acortamiento de la fase de formación y llenado de los granos, predomina sobre los posibles efectos beneficiosos del dióxido de carbono.

La evapotranspiración total de estos cultivos desciende progresivamente a lo largo del próximo siglo, más rápidamente que si el CO₂ no es tomado en cuenta. Esto último indica el drástico efecto esperado de reducción de la evapotranspiración para los cultivos C₄.

Las necesidades de agua de regadío tienen un comportamiento semejante al de la evapotranspiración total, a pesar de que la época de siembra, elegida para estos cultivos, fue la de primavera y en ella ocurre una disminución progresiva de las precipitaciones.

En general, los resultados obtenidos con el sistema DSSAT 3.0 confirman los alcanzados por Rivero y Rivero (1998c) empleando el modelo WOFOST 4.1, y alterando externamente los parámetros genéticos de los cultivares como hicieran Wolf y Diepen (1993). Sin embargo, esto no significa necesariamente que tales impactos vayan a producirse, pues aún la comunidad científica internacional no está segura de que el efecto de fertilización por CO₂ alcance, en condiciones de campo, las mismas magnitudes que han sido determinadas en el laboratorio. Esto concierne en particular a los cultivos con ciclo fotosintético C₃.

Los rendimientos de secano para estos cultivos C₄ disminuyen en todos los escenarios pero más lentamente que si no se toma en cuenta el impacto directo de la concentración del CO₂. La evapotranspiración total decrece progresivamente a lo largo del próximo siglo, más rápidamente que sin tomar en cuenta el impacto directo. Esto denota la influencia positiva del aumento de la concentración del dióxido de carbono en la eficiencia del uso del agua por este tipo de plantas.

La caña de azúcar es una planta C₄ de hábitos indeterminados, cuyo ciclo de vida fue prefijado en nuestros experimentos a 18 meses. Esto condiciona una respuesta diferente de esta planta a la de los cultivos C₄ de hábito determinado.

Los rendimientos de regadío de la caña de azúcar, tomando en consideración el efecto de fertilización por CO₂, crecen a lo largo del siglo venidero tanto para la siembra de primavera como para la de frío (Tabla 3). Estos valores deben ser interpretados como potenciales, ya que el modelo CANEGRO 3.1 no permite simular el cultivo sin tomar en cuenta el balance hídrico.

La evapotranspiración total de la caña de azúcar y las necesidades de agua de regadío aumenta en todos los escenarios, tanto para la siembra de frío como para la de primavera. Los rendimientos de secano decrecen a lo largo del próximo siglo para la siembra de primavera. Sin embargo, para la siembra de frío estos experimentan un ascenso poco significativo a principios de siglo y luego decrecen. El proceso ocurre de tal modo que los rendimientos de secano para ambas épocas de siembra, que son significativamente diferentes en el clima actual, resultan prácticamente indistinguibles para el año 2100. La evapotranspiración total de la caña de azúcar en condiciones de secano, como era de esperar, desciende sistemáticamente durante todo el período.

Los resultados obtenidos tomando en cuenta el efecto fisiológico directo del CO₂ difieren considerablemente de los obtenidos sin él, pero sólo logran revertir los impactos negativos del cambio climático sobre los rendimientos potenciales y de regadío en el caso de los cultivos C₃ de clima cálido como el arroz, la soya y el frijol, y en los C₄ de hábito indeterminado como la caña de azúcar (Tabla 3).

Tabla 3. Rendimientos potenciales y de regadío, en materia seca, tomando en cuenta el efecto de fertilización por CO₂ (Mg / ha).

TABLA 3.
Rendimientos potenciales y de regadío, en materia seca,
tomando en cuenta el efecto de fertilización por CO₂ (Mg / ha).

CULTIVO	ALCANCE TEMPORAL				
	ACTUAL	2010	2030	2050	2100
Papa	12.342	11.814	10.879	10.114	8.012
Soya	3.468	3.811	3.972	4.041	3.939
Frijol	2.917	3.275	3.486	3.613	3.732
Arroz ⁽¹⁾	12.047	12.215	12.342	12.562	13.586
Arroz ⁽²⁾	14.490	14.613	14.857	15.221	16.150
Maíz	12.823	12.318	12.098	11.738	11.057
Sorgo	7.374	7.194	7.042	6.915	6.771
Millo perla	10.100	9.704	9.368	9.077	8.928
Caña de azúcar ⁽¹⁾	76.456	77.022	77.203	77.214	79.065
Caña de azúcar ⁽²⁾	72.114	73.365	73.835	74.261	77.209

Leyenda: (1) Siembra de primavera; (2) Siembra de frío.

Tabla 3.

Para el caso de los rendimientos de secano estudiados, el efecto directo del aumento de la concentración de CO₂ no logra compensar, excepto en los cultivos C3 de clima cálido, la tendencia decreciente debido al efecto indirecto del cambio climático (Tabla 4). Sin embargo, estas tendencias son más lentas que si la influencia del CO₂ no se considera.

Tabla 4. Rendimientos de secano (Mg/ha), en materia seca, tomando en cuenta el efecto de fertilización por CO₂ (Mg / ha).

TABLA 4.
Rendimientos de secano (Mg/ha), en materia seca, tomando
en cuenta el efecto de fertilización por CO₂ (Mg / ha).

CULTIVO	ALCANCE TEMPORAL				
	ACTUAL	2010	2030	2050	2100
Frijol	1.041	1.264	1.413	1.535	1.768
Maíz	12.678	12.213	12.041	11.709	11.051
Sorgo	7.366	7.186	7.034	6.912	6.771
Millo perla	9.619	9.322	9.019	8.748	8.663
Arroz ⁽¹⁾	9.418	9.451	9.495	9.482	9.530
Arroz ⁽²⁾	3.887	3.841	3.868	3.973	4.072
Caña de azúcar ⁽¹⁾	60.093	59.376	58.149	56.076	51.314
Caña de azúcar ⁽²⁾	55.489	55.977	55.583	54.656	51.940

Leyenda: (1) Siembra de primavera; (2) Siembra de frío

Tabla 4.

Conclusiones.

Según los escenarios climáticos utilizados en la presente evaluación, el clima de Cuba experimentará un aumento progresivo de las temperaturas durante el siglo venidero, el que estará acompañado por una disminución del total anual de las precipitaciones y una redistribución de estas a lo largo del año. Estas proyecciones concuerdan con las tendencias generales del clima de Cuba durante la segunda mitad del presente siglo.

Los resultados obtenidos indican que tales condiciones darán lugar a un incremento de la evapotranspiración potencial y a tendencias desfavorables en el ciclo hidrológico, con disminución de los tenores de humedad del suelo, mayor grado de aridez que tendrá su máxima expresión en la región oriental de Cuba. También se producirá un aumento de la frecuencia, duración y severidad de los episodios de sequía, conjuntamente con una disminución considerable del potencial hídrico y de la disponibilidad de agua para el riego, entre otros usos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos para Cuba en estudios similares realizados por la comunidad científica internacional con escenarios semejantes (UKMO, 1997).

Los impactos sobre los rendimientos agrícolas sólo pudieron ser parcialmente evaluados, y la naturaleza de estos dependerá críticamente de que se produzca o no el efecto de fertilización por CO₂ en la escala de campo. Otro factor que ejercería un control considerable sobre tales impactos sería la sensibilidad climática utilizada en los escenarios, pues una sensibilidad alta del clima daría lugar a cambios climáticos de mayor consideración con relación a los niveles correspondientes de concentración de ese gas, contrarrestando así los posibles efectos positivos del efecto de fertilización por CO₂ que, por la naturaleza bioquímica de los procesos involucrados y por la fisiología de las plantas, está necesariamente limitado en magnitud.

De no producirse a escala de campo el efecto de fertilización por CO₂, los rendimientos agrícolas potenciales y de regadío de todos los cultivos disminuirán progresivamente a lo largo del próximo siglo. Esta reducción alcanzaría valores del orden del 10-25% para la mayoría de los cultivos en el año 2100, con relación a sus valores actuales, pero para la caña de azúcar esta sería del orden del 5-10% y para la papa alcanzaría magnitudes muy notables del orden del 45-50%. En algunos casos, esa reducción de los rendimientos potenciales estaría acompañada de un aumento de la variabilidad de estos y mayores probabilidades de obtener rendimientos de desastre en un año determinado. Esta disminución de los rendimientos potenciales sería aún de mayor envergadura en caso de una sensibilidad alta del sistema climático al incremento de la concentración atmosférica de los gases de efecto de invernadero.

La evapotranspiración total de los cultivos disminuirá en general, con la excepción de la papa, pero las necesidades de agua de regadío se elevarían progresivamente y conducirían a rendimientos cada vez más bajos. El aumento de la necesidad de agua para el riego sería del orden del 40-55%, (relativo al clima de referencia) para los cultivos de ciclo corto y del 15-30% para los de ciclo largo y perennes.

Para estas mismas condiciones los rendimientos de secano de los cultivos estudiados disminuirían en un 15-30%, básicamente para los de hábito determinado, siembra de primavera y caña de azúcar, pero este decrecimiento sería menor para los cultivos de siembra de frío.

De producirse a escala de campo el efecto de fertilización por CO₂ habría cambios de consideración en estos impactos pero estos serían más sensibles en los escenarios con sensibilidad baja que en los altos, ya que si el cambio climático es realmente intenso el efecto compensador de ese efecto sería de menor envergadura. Una complejidad adicional está dada porque las respuestas de las plantas será diferente de acuerdo a su época de siembra, el tipo de ciclo fotosintético, del clima al que estén adaptadas, y de si su hábito de vida es determinado o indeterminado.

La modificación más radical al caso ya discutido consiste en que los cultivos C3 de clima cálido y ciclo corto como el frijol, la soya y el arroz, elevarían progresivamente sus rendimientos potenciales y de regadío en un 15-30%. Sin embargo de la papa continuarían disminuyendo en un 30-40%. Los rendimientos de secano experimentarían un aumento del 10-30%, con excepción del frijol en que el aumento sería superior y del arroz que sería del 1-5%, pero ahora dependiendo de la época de siembra.

El efecto del CO₂ disminuirá la evapotranspiración total y el consumo de agua de los cultivos C4 de ciclo corto y hábito determinado como el maíz, el sorgo y el millo perla, pero persistiría la tendencia decreciente de sus rendimientos potenciales y de regadío que ahora estaría en el orden del 8-14%. Sin embargo, para la caña de azúcar estos aumentarían en un 3-7% con relación al clima actual.

Los rendimientos de secano de los cultivos C₄, con inclusión de la caña de azúcar, continuarían disminuyendo a lo largo del próximo siglo con decrementos del 6-15% con relación a sus valores actuales. Sin embargo, sus necesidades de agua de riego serían menores en un 10-30%.

Los rendimientos expuestos se refieren a aquellos que pudieran obtenerse sin escasez de nutrientes en el suelo para cultivos libres de plagas, enfermedades y malas hierbas. De estar presente alguno de estos factores de estrés los reales serían inferiores a estos y podrían decrecer más rápidamente con el tiempo.

Si el efecto de fertilización por CO₂ se generaliza habría cambios sustanciales en la composición de especies por favorecerse la competitividad de las actuales especies C₃ frente a las malezas C₄. En particular, disminuirían las habilidades competitivas de las malezas C₄ en los cultivos C₃, y se elevaría la capacidad perjudicial de las C₃ en cultivos C₄. Ambos tipos de maleza, pero en particular las C₄, se harían más tolerantes a la sequía.

El efecto del cambio climático sobre las malas hierbas se ejercería también sobre los pastizales en áreas ganaderas, que en nuestro caso son predominantemente gramíneas C₄, y podría beneficiar a especies C₃ muy nocivas como el marabú (MINAG, 1998). Esto traería además como consecuencia modificaciones sustanciales en el valor nutritivo, la digestibilidad y la palatabilidad de las especies forrajeras. En particular, pastizales correspondientes a ecosistemas más áridos podrían contener mayor proporción de especies con rasgos xerofíticos que dificultarían su consumo por el ganado vacuno y hacerse más típicos de zonas propias para el ganado ovino- caprino.

RESUMEN

Como respuesta al mandato de la Cumbre Presidencial Centroamericana sobre Cambio Climático de mayo de 2008, se implementa el proyecto La Economía del Cambio Climático en Centroamérica, En el marco del componente de agricultura de este proyecto, este estudio muestra cómo el cambio climático ocasiona reducciones en la producción, los rendimientos y el valor de la tierra de los agricultores de Nicaragua. Además, se cuantifica el efecto directo de las variaciones en temperatura y precipitación sobre la producción, rendimientos y el valor de la renta de la tierra. En el estudio se incluyen los posibles impactos económicos derivados de cambios futuros en el clima, los cuales muestran un escenario poco alentador sobre la producción agropecuaria. Las estimaciones muestran que las pérdidas acumuladas al año 2100 de la producción agropecuaria representarían alrededor de 22% del PIB de 2007, considerando una tasa de descuento de 2%.

Introducción

El cambio climático representa una seria amenaza para las sociedades centroamericanas por sus múltiples impactos previstos en la población y en los sectores productivos. Se estima que para 2030 Centroamérica aun producirá menos de 0,5% de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) del planeta, pero al mismo tiempo ya es una de las regiones más vulnerables ante los embates del cambio climático.

El incremento de la temperatura atmosférica y del mar, la reducción y la inestabilidad del régimen de lluvias y el aumento del nivel del mar, aunado a la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos —como las sequías y los huracanes— impactarán en la producción, la infraestructura, los medios de vida, la salud y la seguridad de la población, además de que debilitarán la capacidad del ambiente para proveer recursos y servicios vitales.

Como respuesta al mandato de la Cumbre Presidencial Centroamericana sobre Cambio Climático de mayo de 2008, la Sede Subregional en México de la CEPAL implementó el proyecto La Economía del Cambio Climático en Centroamérica con las Autoridades de Ambiente, los Ministerios de Finanzas/

Hacienda de esta región, la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA) y la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD). El proyecto fue aprobado por las Autoridades de Ambiente, iniciando en enero de 2009 con financiamiento del Ministerio para el Desarrollo Internacional (DFID) del gobierno británico.

Su finalidad es alertar a los tomadores de decisiones y actores claves de Centroamérica, particularmente los de los ámbitos económicos y sociales, sobre la urgencia de enfrentar el reto de cambio climático y propiciar un diálogo sobre opciones de políticas y acciones nacionales y regionales. Su objetivo específico es realizar una evaluación económica del impacto del cambio climático en Centroamérica con diferentes escenarios de desarrollo y trayectorias de emisiones, frente a los costos y beneficios de potenciales respuestas de inacción (conocida como “business as usual” en inglés) y de opciones de reducción de vulnerabilidad y adaptación, y la transición hacia una economía sostenible y baja en carbono.

En el análisis de los impactos del cambio climático sobre la actividad económica, la agricultura por su importancia como proveedora de alimentos a la población es de los primeros sectores económicos en ser considerados debido a su alta dependencia y sensibilidad a los cambios climáticos.

En años futuros, es muy probable que el cambio climático traerá como consecuencia que los niveles de precipitación y temperatura se modifiquen, al mismo tiempo los fenómenos climáticos extremos aumentarán su frecuencia e intensidad. Incrementos en la temperatura pueden tener efectos positivos o negativos en los rendimientos de los cultivos, dependiendo de la magnitud y del tipo de cultivo. Sin embargo, los efectos positivos pueden revertirse si la temperatura aumenta en demasía. Por su parte, aumentos en la precipitación puede beneficiar a regiones áridas, pero disminuciones en la misma podrían agravar los problemas. En su conjunto estos eventos pueden poner en riesgo el suministro de alimentos a nivel mundial y el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio.

Los más vulnerables son los agricultores pobres, que no tienen tierra, se encuentran aislados y practican la agricultura de subsistencia. En Nicaragua se estima que cerca del 32% de los productores son agricultores de subsistencia. Debido a su condición de pobreza, su falta de acceso al mercado e información, pero sobre todo la escasa infraestructura con la que cuentan hacen muy difícil que estas personas puedan hacer frente a las consecuencias adversas del cambio climático.

Los países centroamericanos son altamente vulnerables a los fenómenos meteorológicos debido a su ubicación geográfica y a la situación de pobreza que enfrentan. Nicaragua, es un país altamente vulnerable ante sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslaves, huracanes, sequías y tsunamis. La población en riesgo ante huracanes y tormentas tropicales en Nicaragua es del 25,4% equivalente a 1,3 millones de personas; mientras que la sequía afecta casi al 45% de la población a nivel nacional. Nicaragua es de los países en el mundo que es más afectado por el paso de tormentas tropicales.

El presente estudio tiene como propósito examinar los impactos potenciales del cambio climático sobre el sector agropecuario, con el fin de brindar elementos que puedan tomarse en cuenta para la formulación de políticas agropecuarias y ambientales, ya que conocer los posibles impactos del cambio climático, es un primer paso hacia la acción eficaz. Se analizan los posibles impactos de las variaciones de las variables climáticas (temperatura y precipitación) sobre el sector agropecuario, sobre algunos de los cultivos más importantes en el país.

Los escenarios climáticos utilizados son el A2 y B2. Estos están conformados por un conjunto de variables relacionadas entre sí (PIB, demografía, tecnología, energía, emisiones, etc.), y se utilizan para proyectar el clima. Dichos escenarios consideran diferentes condiciones de desarrollo global para los próximos 100 años, de modo que permiten modelar los impactos económicos del cambio climático sobre el sector.

Metodología

La metodología y los resultados mostrados son solo una parte del trabajo desarrollado por la CEPAL, proyecto “La economía del cambio climático en Centroamérica”, con la autoría de Diana Ramírez, Juan Luis Ordaz, Jorge Mora y Alicia Acosta bajo la supervisión de Braulio Serna Hidalgo, Jefe de la Unidad de Desarrollo Agrícola de la Sede Subregional de la CEPAL en México.

Resultados

El impacto del cambio climático sobre el sector agropecuario

La agricultura mundial debe hacer frente a muchos problemas en los próximos decenios. Los efectos en los rendimientos de los cultivos variarán dependiendo de la tolerancia al calor y humedad necesaria para cada uno. Se espera que las zonas tropicales sean las más perjudicadas ya que algunos cultivos están cerca de su tolerancia máxima a la temperatura y podrían estar experimentando una reducción significativa en sus rendimientos.

1. Impacto en las funciones de producción agropecuaria

En este apartado se presentan las estimaciones de las funciones de producción que serán utilizadas para medir la sensibilidad del sector agropecuario al cambio climático y posteriormente, se muestran los impactos económicos futuros basados en los modelos climáticos A2 y B2.

El sector agropecuario en Nicaragua tiene un peso importante dentro de la economía nacional, alrededor del 20% del PIB. Sin embargo, la agricultura es un sector vulnerable, que depende fundamentalmente de la lluvia, en Nicaragua este sector se encuentra poco tecnificado y sólo el 1,2% de la superficie agrícola está provista de riego. El cambio climático no sólo afectará a la agricultura, se prevé que el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación tengan efectos negativos sobre la producción pecuaria.

Mediante el análisis de las funciones de producción agropecuarias se ofrece un panorama general de los efectos del cambio climático sobre el sector.

a) Datos

Las funciones de producción agropecuarias se estimaron a partir de la metodología de el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) utilizando datos anuales del período 1961-2005. Cabe señalar que este período cubre años en que tuvo lugar el conflicto bélico que sufrió el país. Los datos utilizados constan de 45 observaciones anuales. Los datos utilizados son los índices de producción agropecuaria tipo Laspeyres, contruidos por la FAO. Igualmente se recurrió a variables de control, como hectáreas de cultivo, superficie provista de riego, número de tractores agrícolas en uso, población económicamente activa (PEA) rural, población económicamente activa (PEA) total y población total.

Estas variables provienen de la base FAOSTAT y de CELADE.

b) Resultados

Se estimaron funciones de producción basadas en los índices de producción agropecuaria, producción de cultivos y producción pecuaria. Los índices se restringieron por la superficie cultivada, a efecto de controlar por la tierra (factor relevante en la producción agropecuaria). Las variables climáticas utilizadas en las especificaciones son: temperatura promedio anual, precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre (que se considera como época de lluvia) y precipitación acumulada anual, con sus respectivos términos cuadráticos. Las variables de control incluidas son variables relacionadas con el factor trabajo: PEA rural, PEA total y población, y con la maquinaria y tecnología: número de tractores en uso y superficie de riego.

c) Índices de producción agropecuaria

La producción agropecuaria es sensible a cambios climáticos, sobre todo los cultivos de temporal, donde no hay forma de compensar la falta de humedad del suelo y las altas temperaturas. Según los diferentes escenarios climáticos el clima sufrirá variaciones severas en los próximos años.

Las ecuaciones de índices de producción agropecuaria fueron estimadas con distintas medidas de precipitación acumulada y temperatura. Para cada función de producción la variable de interés es el índice de producción restringido por la superficie cultivada.

i) Producción agropecuaria. Las distintas estimaciones de la función de producción agropecuaria se formulan en ecuaciones cuyos signos de las variables son los esperados. Los

términos lineales son positivos y los cuadráticos, que muestran los rendimientos decrecientes en temperatura y precipitación, son negativos.

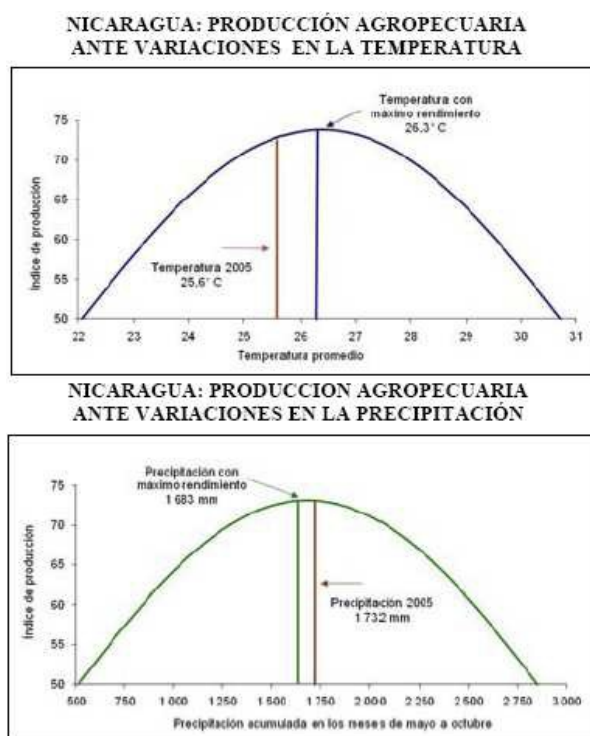


FIGURA 1. Producción agropecuaria ante cambios en las temperaturas y las precipitaciones.

Figura 1.

Figura 1. Producción agropecuaria ante cambios en las temperaturas y las precipitaciones.

Para proyectar el comportamiento de la producción ante variaciones en temperatura y precipitación se eligió la especificación con temperatura promedio y precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre. Para la construcción de esta función se utilizaron como variables de control la PEA rural, la superficie provista de riego y los tractores en uso.

En la Figura 1 se presenta el impacto de variaciones en la temperatura sobre la producción agropecuaria, en esta gráfica se mantuvieron las variables de control constantes con los valores de 2005, con el fin de aislar el efecto de las variables climáticas sobre la producción agropecuaria.

Se observa que la temperatura promedio que se presentó en Nicaragua en 2005 es menor a aquella que permite obtener la producción óptima. El cambio climático, supone un incremento en la temperatura, por lo que se podrían tener efectos positivos en el corto plazo, pero a largo plazo cuando se sobrepase la temperatura que maximiza la función, dichos efectos se revertirían.

En la Figura 1 se presenta además el comportamiento de la producción agropecuaria ante variaciones en la precipitación. El gráfico indica que el nivel de precipitación que presentó Nicaragua en el año 2005

es ligeramente superior al que optimiza la producción. Disminuciones o incrementos en la misma podrían ocasionar un nivel de producción menor.

ii) Producción de cultivos. Para la función de producción de cultivos se estimaron diferentes especificaciones. Para mostrar la estabilidad de los coeficientes y la robustez de las ecuaciones se utilizaron diferentes medidas de temperatura y precipitación, dos formas funcionales (lineal y logarítmica), así como diferentes variables relacionadas con el trabajo (PEA rural, PEA total, población).

Debido a la inclusión de los términos cuadráticos las funciones de producción presentan rendimientos decrecientes en las variables climáticas. Es decir, a bajos niveles de temperatura o precipitación se estimula la producción, a partir de un nivel óptimo los rendimientos decrecen. Para ser consistentes con los resultados de la producción agropecuaria, se eligió la especificación logarítmica con el fin de analizar el comportamiento de la producción ante variaciones climáticas.

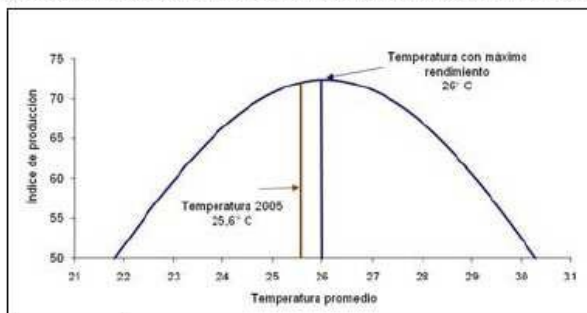
En la Figura 2 se observa que la temperatura promedio de 2005 es medio grado inferior al nivel de temperatura que optimiza la producción. Los diferentes escenarios climáticos proyectan un incremento de temperatura, es probable que el cambio climático tenga efectos positivos en el corto plazo, sin embargo, estos beneficios se invertirían en el largo plazo ocasionando pérdidas al sector.

La precipitación que se presentó en Nicaragua en 2005 es ligeramente superior a la precipitación óptima, como se muestra en la Figura 2. Una ligera disminución provocaría una producción mayor; sin embargo, una disminución o un incremento sustancial de la precipitación en los meses de mayo a octubre ocasionarían un decrecimiento en la producción.

iii) Producción pecuaria. Para observar los efectos del cambio climático sobre la producción pecuaria, se estimaron diferentes estimaciones sobre dicha función, sin embargo, éstas no resultaron tan robustas como en el caso de la producción agropecuaria y de cultivos.

Para mostrar la estabilidad de los parámetros se estimaron varias ecuaciones con diferentes variables explicativas y de control. Se incluyeron las variables de control en logaritmos. Prácticamente ninguna especificación presenta coeficientes significativos para las variables climáticas. No obstante, como indican las pruebas de significancia conjunta, tanto la temperatura como la precipitación son variables relevantes, que tienen efectos en la producción pecuaria.

NICARAGUA: PRODUCCIÓN DE CULTIVOS ANTE VARIACIONES EN LA TEMPERATURA



NICARAGUA: PRODUCCIÓN DE CULTIVOS ANTE VARIACIONES EN LA PRECIPITACIÓN

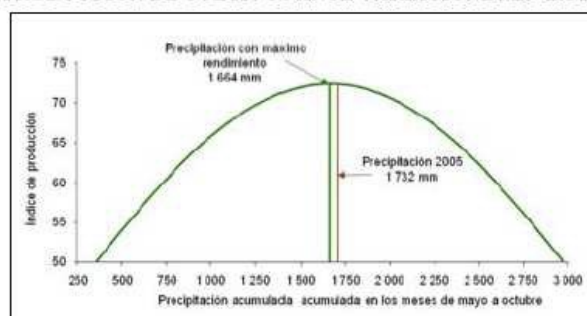


FIGURA 2.

Producción de cultivos ante cambios en las temperaturas y las precipitaciones.

Figura 2.

Figura 2. Producción de cultivos ante cambios en las temperaturas y las precipitaciones.

Debido a que los coeficientes no son significativos, se graficará el índice ante cambios en precipitación y temperatura pero solo para efectos ilustrativos. En el caso de la producción pecuaria se eligió la especificación logarítmica para mostrar el comportamiento de la producción ante variaciones en las variables climáticas ya que es la que presenta niveles de precipitación y temperatura acordes con los resultados anteriores. Se observa que la temperatura de 2005 es menor a aquélla que permite a la producción alcanzar su nivel máximo (Figura 3).

La precipitación de 2005 es ligeramente superior a la precipitación óptima que maximiza la función de producción pecuaria, incrementos o disminución en la precipitación en los meses de mayo a octubre ocasionarían una disminución de la producción (Figura 3).

Las funciones de producción agropecuarias presentan un comportamiento cóncavo. Su forma indica que la producción tiende a incrementarse hasta un cierto nivel, a partir del cual los rendimientos decrecen. La temperatura promedio que permite alcanzar la mayor producción está alrededor de 26° C. Temperaturas mayores o menores a este nivel ocasionarían decrementos en la producción. Igualmente, la precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre que logra la mayor producción posible es de alrededor de 1.660 mm. Niveles mayores o menores a estos niveles causarían una producción menor a la óptima. Cabe aclarar que estos cálculos se realizan manteniendo las variables de control constantes. De la misma forma, no se considera la posibilidad de cambios tecnológicos o medidas de adaptación de los agricultores ante el cambio climático.

NICARAGUA: PRODUCCIÓN PECUARIA ANTE VARIACIONES EN LA TEMPERATURA

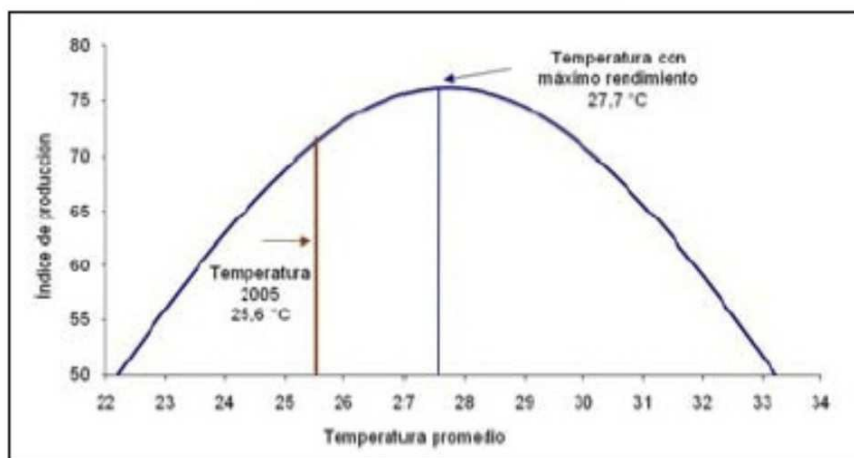


FIGURA 3.

Producción pecuaria ante cambios en las temperaturas y las precipitaciones.

Figura 3.

Figura 3. Producción pecuaria ante cambios en las temperaturas y las precipitaciones.

Impacto sobre los rendimientos de maíz, frijol y café

El maíz, el frijol y el café son tres de los productos más importantes para la economía de Nicaragua. En este apartado se estiman algunas funciones de producción para estos productos a fin de poder determinar las posibles tendencias en la producción ante el cambio en variables climáticas (temperatura y precipitación).

Al igual que en la sección anterior, las estimaciones se realizaron con el método de MCO. La variable de interés en los tres cultivos que se analizan son los rendimientos, medidos en toneladas producidas por hectárea.

El procedimiento seguido para las estimaciones es el mismo que en el caso previo. A partir de la información pasada, en este caso del período 1961-2006, se encuentra un modelo que sea robusto metodológicamente para explicar cómo las variables climáticas se relacionan con los rendimientos. La relación estimada, se utiliza para pronosticar cómo evolucionarían los rendimientos en los siguientes años a partir de distintos escenarios climáticos abordados en el siguiente acápite.

Para estimar las relaciones entre los rendimientos de los cultivos se emplearon como variables climáticas la temperatura promedio anual en los meses de noviembre a abril, que se considera como la época seca, y la precipitación promedio anual en el mismo período. También se emplearon los términos cuadráticos de cada una de esas variables. A diferencia de las estimaciones para los índices de producción, en este caso no es necesario controlar por la variable tierra puesto que los rendimientos están expresados en toneladas por hectárea. No obstante, sí se incluyen variables de control relacionadas con el trabajo; entre ellas, la población y la PEA rural. Además, en algunos casos se controló por la superficie provista para riego y por la maquinaria (número de tractores agrícolas en uso) cuando estas variables fueron relevantes.

Para cada cultivo se estiman cuatro funciones de producción, que consideran a la PEA rural y a la población total de forma lineal y logarítmica.

Es importante mencionar que las estimaciones no controlan por la posible adaptabilidad de los agricultores ante el cambio climático, debido a que no se obtuvo información que lo permitiera. Ello pudo generar que las estimaciones presenten cierta sobrestimación.

a) El caso del maíz

Como resultado de las estimaciones de los rendimientos del maíz a partir de cuatro especificaciones empleadas. Las variables climáticas muestran los signos adecuados, el término lineal es positivo y el cuadrático

negativo. Aunque individualmente, no en todos los casos, la temperatura y la precipitación parecen ser significativas, de forma conjunta sí se encuentra significancia estadística, por lo que ambas variables se consideran relevantes para explicar los rendimientos del maíz. El comportamiento de las dos variables parece ser cóncavo; es decir, que a niveles relativamente bajos tienden a estimular la producción hasta un punto a partir del cual la desincentivan (Figura 4).

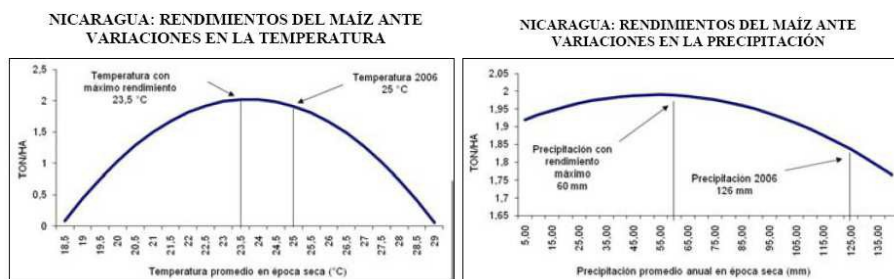


FIGURA 4.

Rendimiento del maíz ante variaciones de temperatura y precipitación.

Figura 4.

Figura 4. Rendimiento del maíz ante variaciones de temperatura y precipitación.

De las cuatro especificaciones, dada su robustez, se optó por elegir a la que incluye a la PEA rural de forma logarítmica, para analizar los efectos del clima sobre la producción del maíz, aunque las otras aportan resultados muy parecidos. Con base en dicha especificación se hicieron proyecciones con variaciones en la temperatura y la precipitación, manteniendo los demás términos constantes con los valores de 2006.

Los resultados para la temperatura se presentan en la Figura 4, en el cual se observa que es probable que ya se haya rebasado el nivel de temperatura que permite alcanzar los mayores rendimientos del maíz en Nicaragua, por lo que el cambio climático podría estar teniendo ya efectos negativos sobre este producto.

En el caso de la precipitación, las proyecciones presentadas en la Figura 9, sugieren que la producción de maíz alcanza su rendimiento máximo en niveles inferiores al de 2006. Incluso niveles de precipitación ligeramente inferiores podrían ser benéficos.

b) El caso del frijol

En cuanto a los resultados de las estimaciones realizadas para los rendimientos del frijol, de forma individual, sólo la precipitación parece ser estadísticamente significativa; sin embargo, cuando ambas variables se evalúan de forma conjunta las dos muestran significancia estadística por la que se pueden considerar como relevantes para explicar el comportamiento de los rendimientos del frijol. Tanto la temperatura como la precipitación muestran los signos adecuados en todos los casos; parecen incentivar la producción en niveles relativamente bajos y desincentivarla en niveles relativamente altos puesto que ambas variables tienen coeficientes positivos mientras sus cuadrados son negativos.

Para analizar los efectos del cambio climático sobre los rendimientos del frijol, también se empleó la especificación que considera a la PEA rural de forma logarítmica debido a su robustez estadística. En la Figura 5 se presentan las proyecciones que consideran diferentes niveles de temperatura, en él se observa que es probable que en el corto plazo el cambio climático no tenga efectos adversos sobre la producción de frijol; no obstante, a largo plazo la producción tendería a reducirse. En la misma Figura 5, las proyecciones mostradas sugieren que el nivel de precipitación de 2006 es cercano al que permite los mayores rendimientos. Incluso niveles ligeramente inferiores podrían generar ganancias en la producción.

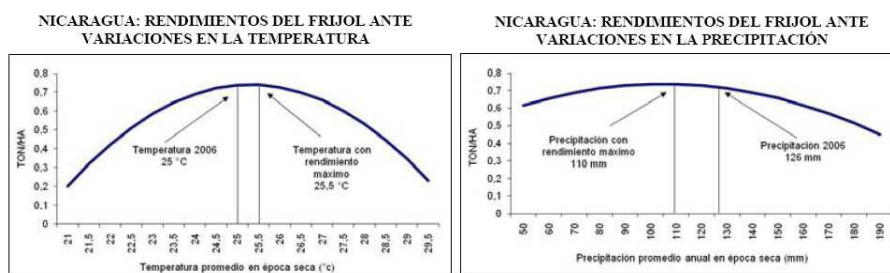


FIGURA 5.
Rendimiento del frijol ante variaciones de temperatura y precipitación.
Figura 5.

c) El caso del café

Los coeficientes estimados sobre los rendimientos del café, para las cuatro especificaciones que consideran a la PEA rural y a la población total, aunque de forma individual los coeficientes de temperatura y precipitación no parecen ser estadísticamente significativos, de forma conjunta las pruebas indican que sí lo son, por lo que ambas variables se pueden considerar como relevantes para explicar los rendimientos del café.

Con el objetivo de mostrar consistencia con los casos anteriores, y dada su robustez, se escogió la especificación que considera a la PEA rural de forma logarítmica. Con base en ella se realizaron proyecciones de comportamiento de la producción a diferentes niveles de temperatura y precipitación.

La Figura 6 muestra que es probable que el nivel de temperatura que permite los mayores rendimientos para este cultivo ya haya sido rebasado, por lo que el cambio climático ya podría estar teniendo efectos desfavorables sobre este cultivo. Con respecto a la precipitación, el gráfico

14 indica que el nivel de precipitación de 2006 es muy cercano al que permite lograr los mayores rendimientos, incluso niveles relativamente inferiores a los actuales podrían traer efectos benéficos.

En la Figura 6 se presentan las proyecciones que consideran diferentes niveles de temperatura y precipitación para los tres cultivos analizados. En él se observa el comportamiento cóncavo de las funciones de producción. En conjunto, las variables climáticas afectan la producción, a niveles relativamente bajos tienden a estimular los rendimientos hasta un punto a partir del cual la desincentivan.

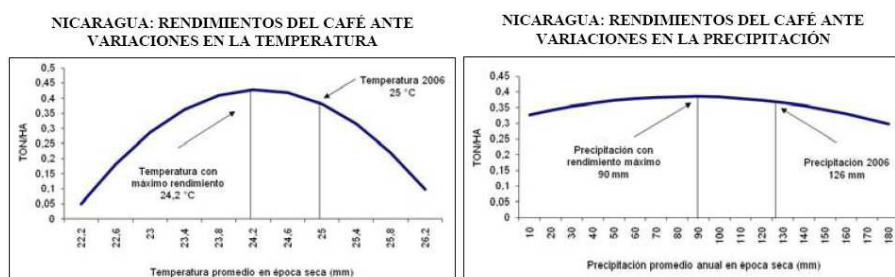


FIGURA 6.
Rendimiento del café ante variaciones de temperatura y precipitación.
Figura 6.

Figura 6. Rendimiento del café ante variaciones de temperatura y precipitación.

Los escenarios futuros: impactos económicos del cambio climático sobre el sector agropecuario.

Este apartado tiene como objetivo presentar las estimaciones de los impactos económicos que sufriría la producción agropecuaria a consecuencia de variaciones en la precipitación y temperatura. Estas estimaciones se basan en las funciones de producción estimadas en las secciones anteriores. El análisis comprende distintos horizontes temporales hasta el año 2100, considera diferentes tasas de descuento (0,5%, 2%, 4% y 8%), y los escenarios climáticos A2 (con base en el promedio de los modelos HADGEM, GFDL y ECHAM16) y

B2 (con base en el promedio de los modelos HADGEM, GFDL y ECHAM). Para realizar el cálculo de los costos o impactos sólo se realizaron variaciones en temperatura y precipitación. Las variables de control se mantuvieron constantes con valores de 2005 y no se consideraron adaptaciones, ni cambios tecnológicos. Los impactos económicos se expresan en términos del PIB de 2007.

Es importante mencionar que las estimaciones de las funciones de producción no toman en cuenta la posible adaptación de los agricultores ante el cambio climático o posibles innovaciones tecnológicas. No fue posible tomar en cuenta estas consideraciones ya que no se contó con variables relevantes como capital humano y cambio tecnológico.

El escenario climático B2 proyecta que la temperatura podría aumentar 2.4 grados Celsius hacia el año 2100 respecto del promedio registrado en 1980-2000, y que la precipitación se reduciría 24%. Las proyecciones correspondientes al escenario climático A2 son más extremas y estiman un incremento en la temperatura de 4.3 grados Celsius, y un porcentaje de caída en la precipitación pluvial del doble que en el escenario B2.

Impactos sobre la producción agropecuaria

A partir de los coeficientes de las especificaciones de las funciones de producción agropecuaria y de cultivos, se cuantifican los impactos en el sector agropecuario ocasionados por las variaciones en la precipitación y la temperatura. El enfoque de la función de producción pretende explorar la magnitud de los impactos de cambios climáticos de los próximos años.

Las estimaciones asumen que el resto de las condiciones se mantienen constantes, ya que se busca aislar el efecto del cambio climático sobre la producción agropecuaria utilizando solo las variables temperatura y precipitación. Asimismo, no se han tomado en cuenta los cambios probables en precios, inversión, tecnología, tierra agrícola y mano de obra.

El resultado de los modelos de funciones de producción exhibe pérdidas económicas ocasionadas por el cambio climático.

Los impactos de la producción agropecuaria hasta el 2100 se contabilizaron en relación al PIB de 2007. Considerando los escenarios A2 y B2, y una tasa de descuento de 4% de forma acumulada hacia 2050 las pérdidas serían de 6% y 2% del PIB de 2007, respectivamente. Contabilizando los impactos negativos hacia 2100 con una tasa de descuento de 4%, las pérdidas económicas acumuladas representarían el 9 % del PIB de 2007 en el escenario A2 y 3 % para el escenario B2. Ante una tasa de descuento de 2% las pérdidas incrementarían a 22% y 6%, respectivamente.

Si consideramos los impactos en el sector agropecuario pero como promedios anuales en distintos períodos de tiempo, podemos observar que tomando como referencia los escenarios A2 y B2, y una tasa de descuento de 4%, las pérdidas anuales de 2006 a 2020 serían de 0,21% y 0,03%, respectivamente. Sin embargo, si tomamos como referencia las pérdidas promedio de 2070 a 2100, las pérdidas anuales serían de 0,08% y 0,01%, respectivamente.

Tomando en cuenta la tasa de descuento de 4% las mayores pérdidas anuales ocurrirán en el período 2006-2020, y si se toma la tasa de descuento de 2% las mayores serán en el período 2070-2100.

La Figura 7 muestran las proyecciones de la producción agropecuaria a partir de los escenarios A2 y B2. Ambos escenarios sugieren pérdidas económicas importantes en la producción agropecuaria. Por su parte la Figura 8 expone la producción de cultivos a partir de los escenarios A2 y B2. El escenario A2 presenta los cambios más extremos (mayor temperatura y menor precipitación, véanse de nuevo la Figura 7 y por tanto es donde se presentan las mayores pérdidas económicas. En la Figura 8 se observa que en el corto plazo la producción oscilaría alrededor de sus niveles actuales, pero a largo plazo la producción irremediabilmente disminuiría.

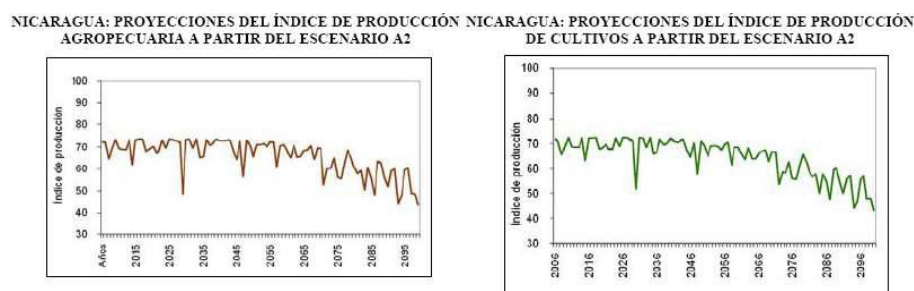


FIGURA 7.

Proyección de los índices de producción agropecuaria y de cultivo para escenario A2.
 Figura 7.

Figura 7. Proyección de los índices de producción agropecuaria y de cultivo para escenario A2.

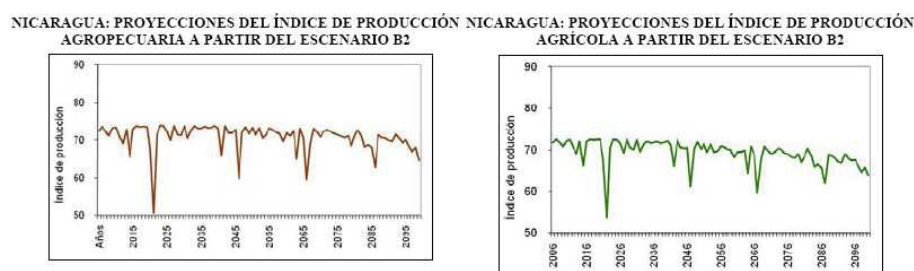


FIGURA 8.

Proyección de los índices de producción agropecuaria y de cultivo para escenario B2.
 Figura 8.

Figura 8. Proyección de los índices de producción agropecuaria y de cultivo para escenario B2.
 Impactos sobre los rendimientos de maíz, frijol y café

Con base en las funciones de producción estimadas para los rendimientos de los cultivos: maíz, frijol y café, se realizaron proyecciones de los posibles efectos, en términos del PIB de 2007, de los cambios en la producción que ocurrirían entre 2006 y 2100 ante los escenarios A2 y B2.

En la Figura 9 se presentan los resultados de las estimaciones para los rendimientos de maíz a partir de los dos escenarios climáticos, las cuáles se calcularon con base en la especificación antes descrita. Las trayectorias en la producción son decrecientes, con mayor caída bajo el escenario A2, el cual llega a mostrar que cerca del final del período los rendimientos tenderían a ser cercanos a media tonelada por hectárea. Es probable que ante el cambio climático los agricultores puedan generar ciertos mecanismos de adaptación, los cuales no están siendo captados en estas estimaciones, por lo que quizá pudiera estarse presentando cierta sobrestimación en las proyecciones; sin embargo, en un escenario climático menos adverso como el B2 también se observa que la producción tendería a reducirse.

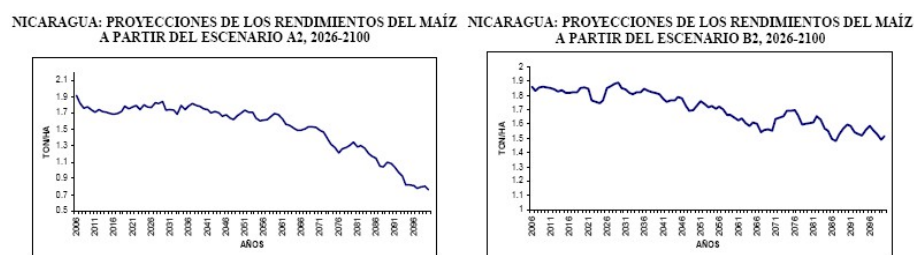


FIGURA 9.

Proyecciones de los rendimientos del maíz en escenarios A2 y B2, desde el 2006 al 2100.
 Figura 9.

Figura 9. Proyecciones de los rendimientos del maíz en escenarios A2 y B2, desde el 2006 al 2100.

Estos resultados conllevarían efectos económicos importantes ya que los posibles costos que ocurrirían ante los resultados mostrados en la Figura 9, los cuales se calcularon comparando los niveles de producción esperado ante los escenarios A2 y B2 y un escenario en el cual el clima ya no variaría. Estos costos del cambio climático podrían ser considerables, en caso de que no se buscara subsanar los efectos del cambio climático. Para el año 2100, con una tasa de descuento de 4% las pérdidas podrían ser equivalentes al 1% del PIB en el escenario B2 y de 2% en el escenario menos favorable.

La Figura 10 muestra la evolución que tendría la producción del frijol entre 2006 y 2100 en los escenarios A2 y B2. También la tendencia es a la baja en los dos escenarios, más acentuada en el escenario más cálido (A2).

Los efectos económicos resultan de los menores niveles de producción del frijol, a corto plazo estos costos podrían ser relativamente bajos, en cambio a largo plazo representarían magnitudes importantes. En el escenario menos adverso, B2, las pérdidas, considerando una tasa de descuento de 4%, serían de alrededor del 1% del PIB; no obstante, ante un escenario más adverso podrían ser ligeramente superiores a 1%.

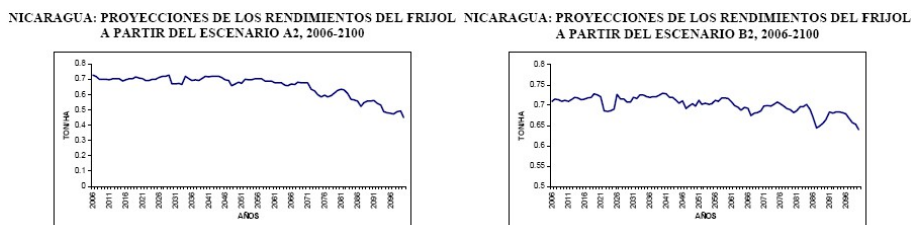


FIGURA 10.

Proyecciones de los rendimientos del frijol en escenarios A2 y B2, desde el 2006 al 2100.

Figura 10.

Figura 10. Proyecciones de los rendimientos del frijol en escenarios A2 y B2, desde el 2006 al 2100.

En la Figura 11 se presentan las proyecciones para el café, basadas en los dos escenarios climáticos (A2 y B2) y su correspondiente especificación. De acuerdo con tales proyecciones, la producción de este cultivo tendería a caer en los siguientes años de forma muy importante. El escenario A2 predice que la producción tendería a ser nula en los últimos años del período, lo cual es poco factible ya que los agricultores podrían adaptarse, ello indica que probablemente se estén sobrestimando los efectos. Sin embargo, en el escenario B2 donde las necesidades de adaptación serían menores también se muestra una tendencia muy acentuada a la baja.

Los costos económicos acumulados que se predicen hacia 2100 serían de alrededor de 2% del PIB en ambos escenarios considerando una tasa de descuento de 4%, pero podrían triplicarse si se considera una tasa de descuento de 2%.

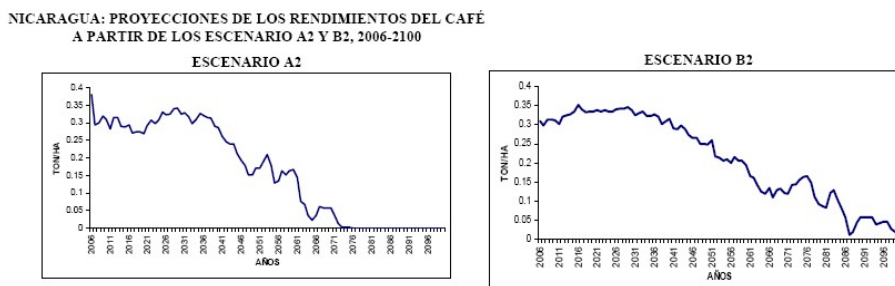


FIGURA 11.

Proyecciones de los rendimientos del café en escenarios A2 y B2, desde el 2006 al 2100.

Figura 11.

CONCLUSIONES

El cambio climático constituye una amenaza para el sector agropecuario, sobre todo para países en desarrollo como es el caso de Nicaragua. En comparación con los cambios en el clima que han ocurrido en las últimas décadas los proyectados en el futuro se muestran más severos. Estos son una amenaza creciente para el desarrollo del sector.

Nicaragua es un país con una proporción importante de población vulnerable a los cambios climáticos, el 46% se encuentra en pobreza extrema y el 30% de los agricultores producen para su subsistencia; estos pequeños productores no tienen recursos para protegerse de los eventos climáticos y el deterioro ambiental; para ellos, pequeñas modificaciones en el clima pueden tener un grandes impactos en sus medios de sustento.

En este trabajo se ha corroborado la sensibilidad del sector agropecuario ante el cambio climático utilizando dos distintas metodologías: las funciones de producción y el análisis Ricardiano. A través de ambos enfoques se prevé una severa disminución en los rendimientos y en la renta de la tierra; por efecto de las variaciones en la precipitación e incremento en la temperatura. Ello permite apuntar que el cambio climático coloca al país en un riesgo latente con respecto a su seguridad alimentaria.

Nicaragua depende fundamentalmente de la producción de maíz y frijol para alimentar a su población, igualmente un porcentaje importante de sus exportaciones corresponden a café. Los resultados indican que estos tres cultivos serán gravemente afectados, repercutiendo de manera importante en la economía del país. El modelo de funciones de producción expone que las variaciones en las variables climáticas acarrearán efectos negativos sobre la producción agropecuaria. Las pérdidas económicas proyectadas a 2100 representan alrededor de 22% del PIB de 2007 (escenario A2 con una tasa de descuento de 2%). Asimismo, y de acuerdo con los resultados, en el caso del maíz al año 2100 las pérdidas podrían oscilar entre 3% y 5% del PIB (considerando una tasa de descuento del 2%). Para el caso del frijol, las pérdidas representarían entre 1% y 3% del PIB y en el caso del café los costos económicos acumulados hacia 2100 se predicen en alrededor de 6% del PIB.

Conocer los efectos del cambio climático puede ayudar a los hacedores de política a tomar decisiones y elaborar políticas agropecuarias acordes a las necesidades de los agricultores, que ayuden los más vulnerables y que garanticen una producción agropecuaria suficiente para los próximos años.

Los agricultores podrían reducir las pérdidas potenciales del cambio climático incrementando los rendimientos agrícolas en las regiones más afectadas, mediante la aplicación de medidas de adaptación relacionadas con mejores prácticas agrícolas, como por ejemplo:

- Adaptar las fechas de siembra a los nuevos ciclos climáticos, es decir, elegir el momento oportuno de siembra para que las plantas se desarrollen adecuadamente. Tomando en cuenta la época de lluvias y los meses de mayor calor para respetar cada una de las etapas de crecimiento de las plantas.

- Practicar la rotación de cultivos y seleccionar las variedades que se adapten a las nuevas condiciones climáticas. De la misma forma considerar las condiciones agroecológicas de la región para adoptar los cultivos más adecuados y disminuir el riesgo de pérdida de cosechas y reducir los costos.

- Utilizar tecnologías que permitan el uso eficiente de los recursos hídricos, además de implementar medidas de conservación y manejo de suelos, con el fin de contribuir a disminuir el deterioro ambiental - Realizar inversiones en sistemas eficientes y económicos de riego, para prevenir los efectos de la reducción en la precipitación. Los sistemas de riego deben ser congruentes con la disponibilidad de los recursos hídricos.

- Utilizar fertilizantes o abono orgánico, entre otras técnicas (cultivos de cobertura, agroforestería) para mejorar la productividad del suelo, estas técnicas deben de ser económicas y de fácil manejo, con el fin de que los agricultores pobres puedan implementarlas.

Estas acciones podrían ayudar a que a los productores minimicen sus pérdidas potenciales debidas al cambio climático. De manera adicional, los programas y políticas gubernamentales deberían tomar en cuenta algunas acciones como por ejemplo: apoyar la implementación de seguros agrícolas, impulsar el acceso a la

información de mercado para que los productores puedan tomar decisiones óptimas, garantizar el acceso a crédito para los agricultores que tienen limitaciones económicas y problemas en cuanto a derechos de propiedad, ya que ellos no pueden acceder fácilmente a un financiamiento que les permita incrementar su producción.

REFERENCIAS

- Benioff, R., S. Guill and J. Lee, eds., 1996: Vulnerability and adaptation assessments: An international Handbook. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 320 pp.
- Centella A., L. Naranjo, L. Paz, P. Cárdenas, B. Lapinel, M. Ballester, R. Pérez, A. Alfonso, C. González, M. Limia, M. Sosa 1997: Variaciones y cambios del clima en Cuba. Informe Técnico. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba, 58 pp.
- Centella, A.; J. Llanes; L. Paz; C. López y Miriam Limia. 2001. Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. República de Cuba. 166
- Diepen, C. A. van, C. Rappoldt, J. Wolf and H. van Keulen (1988): CWFS Crop Growth Simulation Model WOFOST. Documentation Version 4.1. Center for World Food Studies, Wageningen, Holland
- Doorenbos, J., y A. H. Kassam (1988): Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO de Riego y Drenaje 33, Roma, 212 pp
- Hadley Center (1995): Modelling climate change: 1869-2050.
- Hare, K. (1985): Sequía, variación climática y desertificación. Organización Meteorológica Mundial, OMM - No. 653, Ginebra, 35 pp
- Kiker, G. A., y G. Inman-Barber (1996): CANEGRO versión 3.1. Un modelo para el cultivo de caña de azúcar (R. Villalobos y J. A. Retana, eds). Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 4 pp
- Lapinel, B. P., R.E. Rivero, V. Cutié, R.R. Rivero, N. Varela, y M. Sardiñas (1993): Sistema Nacional de Vigilancia de la Sequía: Análisis del período 1931-90. Informe Científico - Técnico, Centro Meteorológico Territorial, Camagüey, 45 pp + tablas
- MINAG (1998): Estrategia Ambiental. Versión preliminar. Dirección de Ciencia y Técnica, Area de Desarrollo y Servicios Técnicos, Ministerio de la Agricultura, La Habana, 47 pp.
- Rivero, Z. I., y R. E. Rivero (1998c): Evaluación comparada del efecto directo de la concentración atmosférica de CO₂, en condiciones del cambio climático, sobre los rendimientos y uso del agua en gramíneas tropicales C3 y C4. Informe Científico - Técnico, Universidad de Oriente / Centro Meteorológico Territorial de Camagüey, Camagüey, 10 p.
- Sellers, W. D. (1970): Physical climatology. Instituto del Libro, La Habana, 272 p.
- UKMO (1997): Climate change and its impacts: a global perspective. Dept. of the Environment, Transport and the Regions, The Meteorological Office, Bracknell, 16 pp
- UNEP / IES (1996): Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies. DRAFT Version 1.3. UNEP / Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Wolf, J., and C. A. van Diepen (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.
- Bouman B.A.M., H. Van Keulen, H.H. van Laar and R. Rabbinge. 1996. The School of de Wit crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agricultural System*, 52(2-3):171- 198.
- Cole, C.V., K. Paustian, E.T. Elliot, A.K. Metherell, D.S. Ojiva and W.J. Parton. (1993). Analysis of agroecosystem carbon pools. *Water, Air and Soil Pollution*, 70:357-371.
- Hoogenboom, G. 2000. "The state of the art in crop modeling". In Sivakumar, M.V.K. (Ed.). (2000). *Climate Prediction and Agriculture. Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999*. Washington DC, USA: International START Secretariat, Pp 69-75.

- Jones, C.A., P.T. Dyke, J.R. Williams, J.R. Kiniry, V.W. Benson, and R.H. Griggs. (1991). EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural System*, 37:341- 350.
- Keating, B.A., G.L. Hammer, P.S. Carberry, D.M. Freebairn, H.M. Meinke and R.L. McCown. (1997). APSIM's contribution to the simulation of agricultural system. *Agronomy Abstracts*, (1997):21.
- Kropff, M.J., H.H. van Laar and R. Mattheus. (1994). ORYZA1, An ecophysiological model for irrigation rice production. *SARP Research Proceedings*. DLO Research Institute for Agrobiolgy and Soil Fertility, Wageningen, The Netherlands. 110 p.
- McCown, R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth and D.M. Freebairn. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural System*, 50:255-271.
- Meinke, H., G.L. Hammer and R. Selvaraju. (2000). Using seasonal climate forecast in agriculture - the Australian experience. In Sivakumar, M.V.K. (Ed.). 2000. *Climate Prediction and Agriculture*. Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999. Washington DC, USA: International START Secretariat, Pp 195-213.
- Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge and A. Bakema. (1989). Simulation of ecophysiological processes of growth of several annual crops. *Simulation Monographs*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudos). Wageningen, The Netherlands.
- Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom and P.K. Thornton (Ed). (1998). *Understanding options for agricultural production*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.