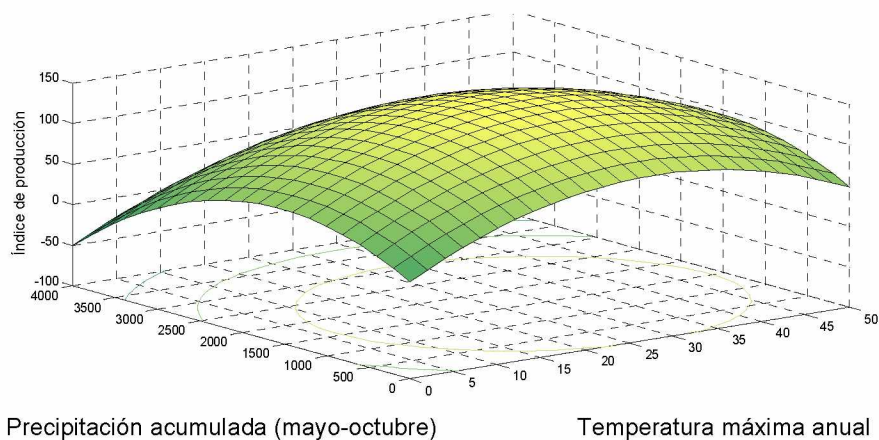


ISTMO CENTROAMERICANO: EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA AGRICULTURA

Índice de producción de cultivos



Este documento técnico de la CEPAL, del proyecto “La economía del cambio climático en Centroamérica” fue elaborado por Diana Ramírez, Juan Luis Ordaz y Jorge Mora. Alicia Acosta contribuyó a la formación de las bases de información, mientras que Braulio Serna Hidalgo participó en su elaboración y supervisó el proceso.

Este documento ha sido revisado por el Comité Técnico Regional del Proyecto.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente coinciden con las de la Organización.

2010-015

ÍNDICE

	<u>Página</u>
RESUMEN EJECUTIVO	1
INTRODUCCIÓN	3
I. REVISIÓN DE LA LITERATURA	6
1. Enfoques metodológicos para estimar los efectos del cambio climático en el sector agropecuario	6
a) Enfoque estructural	6
b) Enfoque espacial	8
2. Estudios previos para Centroamérica	13
II. EL SECTOR AGROPECUARIO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO	14
1. El aporte agropecuario y rural a la economía centroamericana	14
2. Servicios ambientales de la agricultura y del medio rural	15
3. El Istmo Centroamericano ante el cambio climático	17
a) Los efectos del cambio climático en la agricultura, en los últimos años	17
b) Las estrategias, políticas y programas frente al cambio climático ..	18
III. METODOLOGÍAS	20
1. Enfoque de la función de producción	21
2. Enfoque Ricardiano	23
IV. EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL SECTOR AGROPECUARIO	27
1. Impacto en las funciones de producción agropecuaria	28
2. Impacto sobre los rendimientos de maíz, frijol y arroz	35
3. Impacto sobre el valor de la tierra. Datos y resultados del enfoque Ricardiano: El Caso de Honduras	43
V. LOS ESCENARIOS FUTUROS: LOS COSTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL SECTOR AGROPECUARIO	49
1. Costos sobre la producción agropecuaria	49
2. Costos sobre los rendimientos de maíz, frijol y arroz	54
BIBLIOGRAFÍA CITADA	61
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	65
Anexos	67

RESUMEN EJECUTIVO

En respuesta al mandato de la Cumbre Presidencial Centroamericana sobre Cambio Climático celebrada en mayo de 2008, la Sede Subregional de la CEPAL en México está ejecutando 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 se financió con el apoyo del Departamento para el Desarrollo Internacional (DFID) del Gobierno Británico.

En este estudio se muestra cómo el cambio climático ocasiona reducciones en la producción, los rendimientos y las ganancias de los agricultores centroamericanos. Además, se cuantifica el efecto directo de las variaciones en temperatura y precipitación sobre la producción, rendimientos y las ganancias agrícolas.

Una estimación de los efectos e impactos del cambio climático para los años futuros 2020, 2030, 2050, 2070 y 2100, mediante modelos de funciones de producción, indica que el cambio climático producirá impactos negativos sobre la producción agropecuaria. Los cambios en temperatura y precipitación repercutirán en un deficiente suministro de alimentos en la región, y consecuentemente en pérdidas económicas. Estas pérdidas se proyectan en alrededor de 19% del PIB¹. Las estimaciones realizadas con base en los escenarios climáticos predicen que la mayor proporción de las pérdidas se deben a incrementos en la temperatura.

De manera complementaria, al modelar los efectos de las variaciones climáticas en los rendimientos de tres cultivos, maíz, frijol y arroz, los resultados evidencian que es en la producción de frijol donde se presentarían las mayores pérdidas económicas, seguida de la producción de arroz y por último del maíz. A manera de conclusión, es posible determinar que el cambio climático traerá efectos adversos sobre los rendimientos de varios productos agrícolas y pecuarios, lo que en algunos casos se traduciría en pérdidas económicas importantes.

Además, los efectos estimados del cambio climático sobre el ingreso que proviene de la renta de la tierra de los hogares agrícolas centroamericanos indican un escenario desalentador para los países analizados. Si se consideran las estimaciones para 2095, es posible determinar que los impactos de las proyecciones futuras predicen efectos negativos sobre el ingreso de la renta de la tierra o propiedad, que van desde 1% en el caso de Costa Rica hasta 66% en el de Guatemala. Es posible que las distintas variables utilizadas (como la *Proxy*) para medir la productividad agrícola de los países centroamericanos sean el origen de esta dispersión. Es por ello que conviene reforzar las medidas de adaptación de la agricultura del Istmo Centroamericano, más aun cuando se considera la baja capitalización del agro en las dos décadas pasadas, el reducido capital humano y los desafíos alimentarios que enfrenta Centroamérica.

Este informe muestra que para el caso de la producción agropecuaria ya se habría sobrepasado la temperatura y la precipitación que maximizan la producción; es decir, tanto la temperatura como la precipitación actual se encuentran en la parte decreciente de su función. Incrementos tanto en precipitación como en temperatura podrían ocasionar pérdidas en la producción agrícola. Asimismo, los aumentos en temperatura también ocasionarán rendimientos decrecientes en la función de producción pecuaria. Así, el análisis de las funciones de producción señala que el calentamiento global ya está ocasionando efectos negativos en la producción agropecuaria.

¹ Se toma como referencia los impactos a 2100 en porcentajes del PIB de 2007 del Istmo Centroamericano.

Asimismo, se evaluaron los posibles efectos del cambio climático sobre la producción del maíz, el frijol y el arroz. Las estimaciones muestran que —manteniendo las otras variables de control constantes— en el caso del maíz el cambio climático podría generar ganancias en producción en un corto plazo, y después se incurriría en pérdidas. Para el arroz, los resultados sugieren que el calentamiento global conllevaría pérdidas a largo plazo en la producción, ya que se estaría por exceder la temperatura promedio que permite alcanzar el mayor rendimiento, mientras que para el frijol ya se habría rebasado dicha temperatura. En consecuencia, el calentamiento global ya está teniendo efectos negativos sobre este producto.

En el caso de la precipitación promedio anual, manteniendo las otras variables constantes, se identificó que bajos niveles de precipitación tienden a reducir los rendimientos de cada uno de los tres cultivos. Pero cuando la precipitación aumenta se favorece la producción de los tres cultivos sólo hasta cierto nivel. La producción de maíz tiende a decrecer una vez que se rebasan relativamente altos niveles de precipitación para los niveles de la subregión, en tanto que los rendimientos de frijol y arroz tienden a decrecer cuando la precipitación supera el nivel promedio actual de la subregión.

Así, estos resultados iniciales hacen evidente la necesidad de compensar, ya sea con irrigación o con la introducción de nuevas tecnologías, las posibles pérdidas en los niveles de producción que se presentarán y, en algunos casos, se están presentando como consecuencia del cambio climático en el Istmo Centroamericano. Medidas de adaptación de los productores y sus parcelas podrían aliviar estos efectos, como el fomento de la producción de invernadero, métodos de manejo y recuperación de suelos que elevan los rendimientos, cambios en las fechas de siembra asociados a irrigación, introducción de variedades de mayor rendimiento y más resistentes a sequías, así como énfasis en la reconversión de cultivos.

De esta manera, resulta importante continuar desarrollando e implementando las políticas públicas agropecuarias y ambientales, con el propósito de adaptarse a los efectos que el cambio climático podría generar sobre los ingresos y ganancias provenientes de la agricultura, en especial de productores de bajos ingresos.

INTRODUCCIÓN

El Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de 2007 (IPCC, 2007) señala que el fenómeno del calentamiento global es “inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos y el aumento del promedio mundial del nivel del mar.” Así, los años del período 1995-2006 son de los más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial, desde 1850.

Una gran cantidad de estudios científicos evidencian el aumento de la temperatura con concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI), entre los que destaca el dióxido de carbono (CO_2). Estos gases en la atmósfera retienen parte de la radiación solar saliente, lo que eleva la temperatura de la Tierra. Este “efecto invernadero” natural es lo que mantiene nuestro planeta habitable; de no existir, la Tierra tendría una temperatura mucho menor a la actual. Sin embargo, recientemente este proceso se ha acelerado en gran medida por la actividad humana.

Así, aun cuando desde hace más de 500.000 años el ser humano ha estado liberando CO_2 a la atmósfera mediante la quema y cambios en el uso del suelo; en los últimos 200 años esta actividad se ha acelerado de manera muy notable. Las emisiones mundiales de GEI como consecuencia de las actividades humanas aumentaron, desde la era preindustrial, en 70% entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007). Las concentraciones atmosféricas mundiales de CO_2 , metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) se han incrementado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y actualmente son muy superiores a los valores preindustriales. Lo anterior se explica por dos grandes transformaciones en las fuentes de energía para la actividad económica del hombre: el reemplazo de la energía hidráulica por el carbón, y la sustitución de éste por el petróleo.

Al igual que la actividad industrial, las actividades agrícolas también contribuyen a la emisión de CO_2 , metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Metz y otros, 2007). Se estima que la contribución de la agricultura al total de emisiones antropogénicas de GEI es de 10% a 12%. Hacia el 2030 se ha proyectado que las emisiones agrícolas de N_2O aumentarán entre 35% y 60%; ello, debido a un mayor uso del nitrógeno como fertilizante y de una mayor producción de abono animal (FAO, 2003).

La evolución que en el futuro presenten las emisiones de CO_2 provenientes de las actividades agrícolas es incierta. Lo anterior debido a la estabilización o decremento observado en las tasas de deforestación, así como la creciente adopción de prácticas de cultivo de conservación que podrían incidir en que dichas emisiones disminuyeran o se mantuvieran en niveles bajos (Metz, y otros, 2007). Sin embargo, es bien sabido que las emisiones provenientes de otros sectores como la industria son cuantiosas y tienden a crecer.

Por otra parte, existe gran evidencia de que, aun con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquéllas conllevan, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios (IPCC, 2007). Si lo hicieran a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento se acentuaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI cambios probablemente mayores que los observados durante el siglo XX.

También está el consenso con relación a que el calentamiento global tendrá efectos potenciales sobre la agricultura. Por ejemplo, Adams y otros (1988) destacan la modificación en los cultivos debido a un incremento atmosférico en la concentración de CO_2 ; cambios en los patrones de temperatura y

precipitación; probable aumento en la población de plagas a partir del calentamiento global, y ajustes en las demandas y ofertas de agua para irrigación. Así, se espera que en general la productividad de algunos cultivos importantes disminuya, y con ella la productividad pecuaria, con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria. Los cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían notablemente la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e hidroeléctrico y, como resultado, se elevaría el número de personas amenazadas por el hambre.

En general, los países en vías de desarrollo serán más afectados que los desarrollados. De acuerdo con Rosenzweig y Parry (1994), los países en zonas tropicales parecen ser más vulnerables a los impactos potenciales del cambio climático.

Respecto de América Latina y Centroamérica, se han realizado estudios de simulación en la producción de algunos cultivos comerciales bajo distintos escenarios futuros. Parry y otros (2004) señalan que si no se tomaran en cuenta los efectos de CO₂, la reducción en la producción de granos podría ser hasta de 30% bajo el escenario de mayor temperatura. Sin embargo, si se consideran dichos efectos, la producción en algunos países podría incrementarse.

Centroamérica es altamente vulnerable al cambio climático, ya que es afectada por eventos climáticos extremos (huracanes e inundaciones) que dañan el desarrollo y el bienestar de sus habitantes, como se muestra más adelante. Uno de los sectores económicos más importantes en la región es la agricultura, por demás vulnerable a dichos eventos. Como se documenta en Leary, Kulkarni y Seipt (2007), es muy probable que el cambio climático intensifique la gravedad de los fenómenos extremos, y más aún si se toma en cuenta que las acciones de los gobiernos y las medidas preventivas y de adaptación por parte de los productores agrícolas son incipientes y poco estructuradas.

En este documento se analizan algunos impactos potenciales del cambio climático sobre la agricultura en el Istmo Centroamericano, que comprende a Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, y Panamá. Con ello se busca aportar elementos que puedan incluirse en la formulación de políticas agropecuarias y ambientales.

En el capítulo I se hace una revisión de la bibliografía global y centroamericana más relevante sobre el cambio climático y la agricultura, y de la relacionada con las metodologías a utilizarse. En el capítulo II se presenta la situación actual del sector agropecuario y las estrategias adoptadas ante el cambio climático. Las metodologías de la función de producción y del modelo Ricardiano se exponen en el tercer capítulo. En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos con respecto a los impactos de las variables climáticas sobre el sector agropecuario y se desarrollan posibles escenarios de los efectos que el cambio climático generaría en el sector. Se examinan, además, los efectos sobre los índices de producción de cultivos, cereales, agropecuario y pecuario, así como, sobre los rendimientos en la producción de maíz, frijol y arroz. Asimismo, se presentan, desde una perspectiva Ricardiana, los resultados del impacto que el cambio climático tiene en el valor de la tierra para el caso de Honduras. En el capítulo V se estiman los impactos futuros en el sector agropecuario ocasionados por variaciones en la

precipitación y la temperatura, para cuyo cálculo se utilizan dos escenarios de cambio climático, el A2 y el B2² a distintos horizontes temporales. Por último, en el capítulo VI se presentan las conclusiones.

En la elaboración del presente estudio participaron los investigadores Diana Ramírez, Juan Luis Ordaz y Jorge Mora. Alicia Acosta contribuyó en la formación de las bases de información. Braulio Serna Hidalgo, además de participar en la elaboración del documento, coordinó y supervisó el proceso.

² Escenarios que simulan el sistema climático mundial, conformados por un conjunto de variables relacionadas entre sí (PIB, demografía, tecnología, energía, emisiones, etc.), que son internamente consistentes. Cada escenario describe un posible futuro. Las familias de escenarios divergen cualitativa y cuantitativamente. La familia “A2” describe un mundo muy heterogéneo basado en la autosuficiencia y preservación de las identidades locales y una lenta convergencia entre regiones, mientras que el “B2” presenta cambios más graduales y desarrollos menos extremos en todos los sentidos, incluyendo geopolítica, demografía, crecimiento de la productividad, dinámicas tecnológicas, entre otros. Asimismo, considera que el patrón de desarrollo futuro es más fragmentado y similar a las tendencias actuales y no permite la inclusión de tendencias de convergencia particularmente fuertes.

I. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El calentamiento global ocasionado por la actividad humana es un hecho confirmado. El clima y sus variaciones constituyen uno de los determinantes más importantes del comportamiento de la producción agrícola y de alimentos. El cambio climático influye directamente sobre el crecimiento y el desarrollo de plantas y cultivos, los balances hidrológicos, la frecuencia, tipo e intensidad de los cultivos, así como en la severidad de la erosión de la tierra. También afecta, entre otras variables, la disponibilidad y temporalidad de los sistemas de irrigación.

Desde hace algunas décadas, pero con mayor intensidad en las dos últimas, se ha manifestado un gran interés por analizar y medir los efectos del cambio climático en la actividad agrícola. Los primeros análisis se basaban en simples encuestas de opinión a expertos en el tema y en experimentos de laboratorio que estudiaban los efectos de cambios en la temperatura sobre la producción de algunos cultivos, cuyos resultados se utilizaban para predecir cómo se alterarían los cultivos bajo diferentes escenarios climáticos (Maddison y otros, 2007).

Posteriormente, las investigaciones se enfocaron en los efectos directos del cambio climático sobre la producción de ciertos cultivos (principalmente granos, como el trigo y el maíz) y, más recientemente, se han incluido en el análisis las interacciones y canales de transmisión entre regiones, así como una variedad más amplia de cultivos.

En este capítulo se realiza una descripción de los principales trabajos, en los que se han evaluado los efectos del cambio climático en el sector agropecuario de diferentes países y los enfoques metodológicos en los que se insertan. También se revisan algunas de las investigaciones realizadas para la región centroamericana.

1. Enfoques metodológicos para estimar los efectos del cambio climático en el sector agropecuario

En general, es posible agrupar los métodos utilizados para medir los efectos del cambio climático en el sector agropecuario en dos enfoques metodológicos: estructural y espacial (McCarl y otros, 2001; Molua y otros, 2007, Schimmelpfennig y otros, 1996). El primero combina las respuestas físicas de los cultivos con las respuestas económicas de los agricultores, mientras que el espacial explota las diferencias observadas en la producción agrícola y el clima entre regiones. Por tanto, ambos métodos se consideran complementarios.

a) **Enfoque estructural**

El enfoque estructural utiliza modelos interdisciplinarios para simular cambios en cultivos específicos. Se estima la respuesta de los cultivos ante escenarios climáticos en que se especifiquen promedios anuales por décadas o datos con una frecuencia diaria para un cierto conjunto de atributos climáticos, más comúnmente, la temperatura y la precipitación. Una vez obtenidos los efectos estimados, se incorporan en modelos económicos del sector agrícola para simular cambios en la oferta de los cultivos y los precios del mercado. Con este enfoque se supone que agricultores y consumidores minimizan impactos o maximizan su bienestar, sujeto a las restricciones climáticas impuestas en el modelo. Tiene la ventaja de que permite obtener información detallada de las respuestas físicas, biológicas y económicas, así como los posibles ajustes. Una de sus desventajas es que para estudios agregados se requieren

múltiples inferencias para grandes áreas y sistemas diversos de producción a partir de pocos lugares y cultivos (Schimmelpfennig y otros, 1996).

Los primeros análisis del impacto del cambio climático en la agricultura, realizados con el enfoque estructural, se concentraron en estudiar los efectos en las condiciones agroclimáticas en el crecimiento de las plantas; los efectos en la producción regional de alimentos y los rendimientos económicos de dicha actividad, y en algunas implicaciones para la selección de cultivos, comercio internacional y políticas públicas.

Entre los estudios pioneros de impacto que se inscriben en esta corriente metodológica se encuentran los trabajos de Warrick (1984) y Terjung y otros (1984). En el primero, a través de modelos de regresión, se simulan incrementos en la temperatura, similares a los ocurridos en la década de los años treinta, y se concluye que, como resultado, la producción de los cultivos declinaría. En tanto que Terjung y otros (1984) concluyen que las cantidades de agua para irrigación tendrían que ser mayores ante la elevación de la temperatura si no existieran cambios tecnológicos.

Easterling y otros (1993) también emplean los datos sobre el clima observados en la década de los treinta para simular las posibles temperaturas que se observarían en algunas regiones de los Estados Unidos como consecuencia del cambio climático. A partir de sus resultados, éstos muestran que, en ausencia de modificaciones tecnológicas e incrementos en el CO₂, el cambio climático traería como consecuencia reducciones importantes en la producción y con ello pérdidas económicas.

Posteriormente, otros trabajos comenzaron a incorporar como variable relevante la adaptación humana al cambio climático, así como los efectos de factores no climáticos y no locales (Smit y otros, 1996). La inclusión de la adaptabilidad humana en los modelos elimina el supuesto del “agricultor ingenuo” implícito en ellos. El comportamiento gradual del cambio climático y los diferentes mecanismos por los que los agricultores se adaptan al clima observado para tratar de mitigar sus efectos finalmente se fueron incorporando de manera explícita como variables en los modelos estructurales. La inclusión de variables adaptativas de los agricultores en el análisis reduce la posibilidad de sobreestimar los aspectos negativos y subestimar los impactos benéficos del cambio climático.

Estudios subsecuentes a nivel de país/región expandieron el análisis económico de los efectos del cambio climático en la agricultura, al incluir un mayor número de adaptaciones a nivel de granja, sustituciones en los insumos y productos, efectos en los precios de las *commodities*, e impactos en el bienestar. Por ejemplo, Adams y otros (1988) estudian los efectos económicos del calentamiento global sobre la región oeste de los Estados Unidos. Sus resultados muestran que el cambio climático causado por el incremento en los niveles de CO₂ tendrá el potencial para modificar la estructura de la agricultura estadounidense, trayendo consigo importantes pérdidas económicas, superiores entre dos y 10 veces a cualquier otro problema ambiental.

Por su parte, Darwin y otros (1995) evalúan los efectos del cambio climático global sobre la agricultura mundial con base en un modelo que considera interacciones entre el clima, el sector agrícola, los recursos de agua, la producción, el comercio y el consumo. Ellos encuentran que la producción mundial declinaría si el cambio climático es suficientemente severo y si se obstaculiza la expansión de la tierra de cultivo, y que las pérdidas no serían homogéneas entre regiones. Mientras que en las regiones montañosas y del ártico se elevaría la cantidad de tierra cultivable, en las regiones tropicales decrecería la productividad agrícola ante una reducción en la humedad del suelo.

Muchos de los estudios representativos del enfoque estructural se basan en una función de producción empírica para predecir los efectos del clima sobre los cultivos³. En el apartado en que se describe la metodología se explican algunas de las ventajas y desventajas de este método de estimación.

b) Enfoque espacial

Los modelos que se inscriben dentro del enfoque espacial buscan estimar los efectos del cambio climático en la agricultura con base en las diferencias observadas en los valores de la tierra, la producción agrícola y otros impactos climáticos relacionados entre regiones, utilizando métodos estadísticos o de programación para analizar cambios en los patrones espaciales de la producción (Molua y otros, 2007). Los análisis de este enfoque se basan en modelos Ricardianos, modelos de Equilibrio General Computable (CGE, por sus siglas en inglés), modelos de Sistemas de Información Geográfica, entre otros.

En el marco de un incremento esperado en la temperatura global, este enfoque metodológico busca identificar de qué manera aquellas regiones con climas más fríos podrían adaptarse a las prácticas seguidas en regiones más cálidas y sus implicaciones. Lo anterior se logra mediante un análisis estadístico entre áreas geográficas, por el que se separan aquellos factores que explican las diferencias de producción entre regiones. Uno de los supuestos implícitos en este enfoque es que los agricultores estarán dispuestos y serán capaces de adoptar las prácticas y los cultivos prevalecientes en las regiones más cálidas.

Entre las ventajas de este enfoque se encuentra el poder estimar el impacto directo del cambio climático en unidades, con un elevado grado de desagregación (a nivel de granja, por ejemplo) y tomar en consideración otras variables muy relevantes como la calidad de la tierra. No obstante, los resultados que se derivan de estos modelos dependen de que los datos disponibles sean representativos de las unidades geográficas consideradas y de la capacidad del análisis estadístico para aislar efectos proclives a confundirse.

A diferencia de los modelos inscritos en el enfoque estructural, los modelos espaciales asumen que los ajustes biológicos, físicos y económicos impuestos por el cambio climático a plantas, cultivos y agricultores se realizarán de manera automática. Ello elimina la necesidad de modelar las conductas adaptativas de plantas, cultivos y agricultores para, con los resultados obtenidos, estimar en una segunda etapa los efectos del clima en la variable económica de interés de cierto tipo de cultivo. Sin embargo, estos modelos sólo consideran aquellas variables de conductas adaptativas que se refieren al largo plazo y no a las relacionadas con impactos de ajuste en el corto y mediano plazos.

Dentro de los modelos de este enfoque, el Ricardiano ha adquirido especial notoriedad. Este modelo se basa en la teoría de que, en mercados competitivos, el valor de la tierra representa el valor presente de los ingresos netos esperados derivado del uso eficiente de la tierra. Por medio de técnicas de regresión, el modelo Ricardiano estima los efectos de variaciones en el clima y factores económicos y no económicos en el valor de la tierra agrícola, con información desagregada a cierto detalle. Por ejemplo, Mendelsohn y otros (1994) analizan la influencia del clima sobre la renta neta (o valor) de la tierra agrícola, utilizando información transversal a nivel de condado para los Estados Unidos. Encuentran que mayores temperaturas en todas las estaciones del año, excepto el otoño, reducen los valores promedio de las tierras. También muestran que existen diferencias con respecto a la estimación por los métodos tradicionales que se basan en la función de producción.

³ Véase, por ejemplo, Adams y otros (1988), Finger y Schmid (2007), Gay y otros (2004).

Schlenker y otros (2006), con base en información de diferentes condados de los Estados Unidos, analizan el impacto del calentamiento global en la agricultura. Emplean como variables independientes medidas climáticas, características del suelo y condiciones socioeconómicas. Sus resultados muestran de moderadas ganancias a grandes pérdidas para los condados que analizan.

Molua y Lambi (2007) emplean un enfoque Ricardiano para medir la relación entre el clima y la ganancia neta de los cultivos con base en información de 800 granjas agrícolas de Camerún. Concluyen que la ganancia neta disminuye a medida que la precipitación decrece y la temperatura aumenta.

Maddison y otros (2007) a partir de un modelo Ricardiano basado en 11 países del Continente Africano y utilizando la percepción individual de los agricultores con respecto al valor de la tierra, como variable dependiente, encuentran que hacia 2050 habría pérdidas importantes de producción agrícola en algunos países.

Al aplicar el análisis Ricardiano, Mendelsohn, Dinar y Sanghi (2001) realizan una comparación entre la sensibilidad al cambio climático de los Estados Unidos y de la India. El análisis revela que la función Ricardiana de la India es mucho más sensible que la correspondiente a los Estados Unidos, por lo que el calentamiento global tendrá mayores efectos negativos para el país asiático. Los resultados sugieren que el nivel de desarrollo tiene un efecto importante en la sensibilidad al cambio climático de los países. Los productores agrícolas en países subdesarrollados son más sensibles que los productores de países desarrollados. Si el cambio climático ocurriera hoy, los efectos para países de climas cálidos y en vías de desarrollo serían considerables. Sin embargo, conforme los sistemas agrícolas de países en desarrollo mejoren, los efectos adversos del cambio climático podrían verse reducidos.

Los resultados de un análisis realizado para Sri Lanka (Seo, Mendelsohn y Munasinghe, 2005) indican que incrementos en el nivel de temperatura están asociados con disminuciones en los niveles de ingreso neto de los productores agrícolas, mientras que una mayor precipitación tiene efectos positivos en los mismos. Al aplicar los resultados obtenidos a diferentes escenarios de cambio climático se obtiene un rango de efectos, que va desde una pérdida del 20% a una ganancia del 72% del valor actual de la tierra para el año 2100. Las pérdidas se obtienen con escenarios en los que el incremento de la temperatura es sustancial y los efectos positivos de incrementos en la precipitación no alcanzan a compensar tales pérdidas.

En el estudio de Seo y Mendelsohn (2006) se halla que el ingreso neto ganadero, en una muestra de 5.400 productores en 11 países de África, es altamente sensible a cambios en variables climáticas fundamentales. En particular, el ingreso neto de grandes productores se ve reducido por aumentos en la temperatura, mientras que el ingreso neto de pequeños productores se incrementa conforme ésta se eleva. Dicho panorama se mantiene en las predicciones de estos efectos para el presente siglo, un incremento de hasta 116% del ingreso en 2100 para pequeños productores y una pérdida de 24% para grandes productores en 2060. La interpretación que los autores dan al resultado es que los pequeños productores manejan especies tolerantes a altas temperaturas, en tanto que los grandes productores ganaderos dependen principalmente del ganado bovino, el cual es menos tolerante a las altas temperaturas. Los resultados muestran, también, que aumentos en la precipitación disminuyen el ingreso neto ganadero, mediante un incremento en la adopción de la agricultura como actividad, la sustitución de pastos por vegetación arbórea y mayores enfermedades animales.

Como continuación, Seo y Mendelsohn (2008) desarrollan un modelo Ricardiano estructural, que toma en cuenta las decisiones de adaptación de los productores. Consistente con los resultados anteriores, este análisis muestra que para el año 2100 el ingreso neto obtenido de ganado bovino para carne

descenderá entre 10% y 50%, dependiendo del escenario climático. En contraste, el ingreso neto proveniente de ganado bovino para leche se elevará de 30% a 50%. Los ingresos netos de ganado ovino, caprino y aviar suben en la mayoría de los escenarios. A nivel agregado, el ingreso neto ganadero presenta pérdidas a mediados de siglo XXI, pero conforme los productores se adaptan hacia especies más tolerantes, el ingreso neto ganadero hacia finales de siglo presenta incrementos significativos.

Con datos a nivel municipal para Brasil y a nivel de condados para los Estados Unidos, Mendelsohn y otros (2007) confirman que el cambio climático tiene efectos significativos en el ingreso rural, principalmente por sus efectos en la productividad agrícola. En los Estados Unidos, país en donde los productores agrícolas tienen acceso a capital y tecnología moderna, un aumento del 10% en la temperatura llevaría a una pérdida del 0,16% en el ingreso por habitante rural. La pérdida sería del 5,5% en un país subdesarrollado como Brasil. El análisis Ricardiano muestra que un incremento del 10% en la temperatura lleva a una reducción del 13% del valor de la tierra en los Estados Unidos y del 33% en Brasil. Como lo muestran los autores, el valor de la tierra y el ingreso neto agrícola son determinantes directos de los niveles de ingreso por habitante rural y, por lo tanto, el cambio climático podría ser un determinante importante de los niveles de pobreza en los años futuros.

Con una muestra de 2.003 granjas en siete países sudamericanos, Mendelsohn y Seo (2007) encuentran evidencia empírica de que el valor de la tierra es sensible a cambios climáticos. Incrementos en la temperatura tienen efectos negativos en el valor de la tierra, mientras que una mayor precipitación tiende a elevar el flujo de ingresos futuros de los productores. Sus resultados muestran que, en un escenario climático bastante severo, el valor de la tierra disminuirá 30% para el 2100. Dichos resultados también indican que el cambio climático tendrá efectos, no sólo en el flujo esperado de ingresos, sino también en el tipo de actividad productiva (producción agrícola vs producción pecuaria) y tipo de irrigación (riego vs temporal) que los productores adoptarán.

Con una muestra mayor a 2.000 observaciones de granjas sudamericanas, Seo y Mendelsohn (2008^a) pronostican que los productores agrícolas de la zona perderán, en promedio, hasta 62% de su flujo futuro de ingresos. De acuerdo con sus resultados, la sensibilidad de productores de temporal y riego es diferente. Los primeros son más sensibles a cambios en temperatura, mientras que los otros lo son a cambios en la precipitación. En un análisis similar, Seo y Mendelsohn (2008^b) estiman que, en promedio, productores grandes y pequeños perderán hasta 25% del valor de su flujo de ingresos para 2060. El porcentaje sube hasta 50% en el escenario climático más severo correspondiente a 2100.

En un análisis para México (Mendelsohn, Christensen y Arellano, 2009) se muestran resultados bastante parecidos, pues las pérdidas estimadas para 2100 son del orden de 42% a 54%, dependiendo de la severidad del escenario climático utilizado. Los productores de riego se ven ligeramente más afectados que los productores de temporal, mientras que no existe distinción clara entre los efectos para pequeños y grandes productores, pues varía de acuerdo con el escenario climático que se utilice. En todos los casos, las pérdidas ocasionadas por el cambio climático para cualquier grupo de productores son negativas.

Algo en común, entre los estudios aplicados en países latinoamericanos, es que la magnitud de los impactos resulta distinta para los diferentes países, e incluso para distintas regiones, al interior de los mismos. A pesar de los efectos negativos agregados, es posible que algunas regiones al interior de los países, como en el caso de México, resulten beneficiadas por el cambio climático. Se observa, también, que los efectos negativos tienden a ser más adversos conforme el análisis se centra en el ecuador, con potenciales beneficios en el sur del continente (de la Torre, Fajnzylber y Nash, 2009).

Es importante mencionar que estos resultados coinciden con los obtenidos utilizando modelos agronómicos de impacto. En dichos modelos se evalúa el efecto que el cambio climático puede tener en el rendimiento por hectárea de determinados cultivos. Cline (2007) hace una comparación de los resultados obtenidos usando ambos enfoques. Se observa que, en la gran mayoría de casos, el efecto del cambio climático es siempre negativo en los países incluidos en su estudio. Al combinar los resultados de ambos modelos, se tiene que la producción agrícola global caerá 16% para 2080. En concordancia con Mendelsohn, Dinar y Sanghi (2001), los mayores efectos recaerán en países en vías de desarrollo, con pérdidas de alrededor del 25%, mientras que para países industrializados la pérdida estimada es de sólo 6%. Las pérdidas son también mayores para países cercanos al ecuador y en latitudes bajas, en donde las temperaturas tienden a ser más elevadas.

Además de su aplicación en el análisis de los efectos directos del cambio climático en la productividad agrícola, los principios del análisis Ricardiano han sido aplicados en el estudio de las decisiones adaptativas de los productores ante nuevos escenarios climáticos, como los cultivos agrícolas que se adoptarán (Seo y Mendelsohn, 2008c), las especies ganaderas (Seo y Mendelsohn, 2008), o bien el probable efecto en las decisiones de emigración de los hogares rurales (Mora y Yúnez, 2008).

Independientemente del enfoque metodológico en el que se inscriban, los estudios realizados a nivel de un país/región individual brindan las primeras estimaciones de cómo el cambio climático podría afectar los mercados agrícolas y la utilización de insumos. Por lo general, los resultados muestran de pequeñas a grandes reducciones en la producción de cultivos, pero posibles ganancias netas en el bienestar del agricultor, una vez adaptado al cambio, así como mayores precios de los cultivos y efectos del CO₂ en el crecimiento de los cultivos.

De acuerdo con Darwin y otros (1995), existen dos limitaciones importantes que los estudios a nivel país/región no consideran: i) los efectos del cambio climático en otras regiones (pues asumen que el clima fuera del área de estudio se mantiene constante), y ii) el papel del comercio mundial en diseminar los efectos entre las distintas regiones.

Los CGE modelan la agricultura respecto de otros sectores económicos y permiten el movimiento de recursos entre sectores en respuesta a los incentivos económicos. Sin embargo, si bien los CGE tienen la ventaja de tomar los precios como endógenos y consideran vínculos intersectoriales, esto lo hacen a costa de agregaciones muy drásticas, en las que los diversos sectores espaciales o económicos están caracterizados por una empresa o granja representativa (Schlenker y otros, 2006).

Entre los estudios basados en CGE, destaca el de Rosenzweig y Parry (1994), quienes examinaron los efectos del cambio climático en la producción mundial de cereal y la distribución de dichos impactos entre los países desarrollados y en desarrollo para el año 2060. Estos autores reportaron una disminución en la producción mundial de cereal, que oscila entre 1% y 8%, y los precios se elevaron entre 24% y 145%. El incluir las adaptaciones de los agricultores a nivel de granja contribuyó a mitigar los impactos anteriores; así, los cambios en la producción mundial de cereal oscilaron entre -2,5% y 1%, mientras que los cambios en el precio mundial se ubicaron en -5% y 3,5%.

Por último, en los años noventa se comenzó a analizar los impactos potenciales del cambio climático sobre el ganado. Entre los estudios que se inscriben en esta nueva línea, los resultados son consistentes en cuanto a que, debido a las reducciones en la eficiencia de conversión de alimentación, el cambio climático global podría disminuir la ganancia de peso en los animales y la producción de productos lácteos durante el verano en zonas relativamente cálidas, como el sur de los Estados Unidos (Klinedinst y

otros, 1993; Baker y otros, 1993). En áreas relativamente frías, el ganado que pasta tiene generalmente un mejor desempeño (debido al mayor forrajeo), pero aquellas operaciones más intensivas en capital, como la ordeña, podrían verse afectadas de manera negativa (Klinedinst y otros, 1993; Baker y otros, 1993).

En el presente estudio se usarán tanto el enfoque estructural como el espacial, a fin de obtener resultados robustos metodológicamente.

Antes de describir la metodología utilizada, se revisarán algunos de los estudios que se han realizado previamente para Centroamérica.

2. Estudios previos para Centroamérica

Centroamérica es una región en la que los efectos del clima se han manifestado a través de importantes desastres naturales, los cuales han implicado pérdidas significativas en el sector agrícola. Los eventos climatológicos del Niño y la Niña han ocasionado mayor variación interanual en el clima de los trópicos. De acuerdo con Fournier y Di Stefano (2004), en la vertiente pacífica de Centroamérica, el Niño fue un período de menores lluvias, atraso en el inicio de las mismas, mayores temperaturas, reducción de la nubosidad, veranillos más prolongados entre julio y agosto y una mayor insolación. Esto ha favorecido la ocurrencia de incendios forestales y pérdidas en la producción de granos. También ha provocado desfases en la ejecución de prácticas de manejo agrícola, como el control de malezas, plagas y enfermedades, fertilizantes y recolección de cosechas.

Al respecto, Harmeling (2007) muestra que los países centroamericanos se encuentran entre los principales países con alto riesgo climático. Honduras y Nicaragua se ubican en la posición 1 y 2, respectivamente, en la posición del Índice Global de Riesgo Climático construido para el período 1997-2006, el cual involucra tanto las consecuencias económicas como poblacionales. Pocos son los países en el mundo que sufren fuertes impactos por fenómenos climáticos, tanto en frecuencia como intensidad, como es el caso de estas naciones, lo que hace necesario conocer las posibles implicaciones que en el futuro tendrá el cambio climático sobre la agricultura, un sector muy importante en la región centroamericana.

Vega y Gámez (2003) realizaron uno de los trabajos en los que se busca determinar las implicaciones económicas de los desastres por eventos hidrometeorológicos en la economía centroamericana, en específico la de Costa Rica. Analizan el período 1996-2001 y estiman una pérdida en cultivos promedio anual para dicho país de 1,07% del PIB agrícola.

Magrin y Gay (en Alfaro y Rivera, 2008), en su estudio, encuentran que para los países de Mesoamérica, si no se consideran los efectos del CO₂, las reducciones en el rendimiento de los granos podrían alcanzar 30% para el año 2080 en el escenario más cálido. Se espera que para esta región, el cambio climático ocasione la salinización y desertificación de las tierras agrícolas; así, para 2050 estos fenómenos afectarán 50% de dichas tierras. Por otra parte, se proyecta que la demanda de agua para irrigación se incremente ante un clima más caliente y ocasione mayor competencia entre el uso doméstico y el agrícola.

En ese mismo sentido apuntan los resultados de Monterrosa de Tobar (1998) que, para el caso de El Salvador, hallan que el cambio climático podría ocasionar pérdidas que sólo para el cultivo de maíz significan entre 3,1 y 7,5 millones de dólares en 2025 y 2100, respectivamente. Al considerarse las pérdidas para la producción de granos básicos, encuentran que éstas llegan a 10,9 millones de dólares en el año 2025, y a 24,9 millones de dólares en 2100.

II. EL SECTOR AGROPECUARIO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Como se señaló a nivel global, se sabe que la agricultura es especialmente vulnerable a los cambios de precipitación y temperatura. La producción de los diferentes cultivos reacciona de distinta manera a estos cambios. Las enfermedades y las pestes tienden a aumentar con la elevación de la temperatura. Las malas hierbas se propagan más y baja la calidad de los pastos (Backlund, Janetos y Schimel, 2009 y Cline, 2007). En los países del Istmo Centroamericano los efectos adversos del cambio climático sobre la agricultura se han acentuado en la presente década.

Debido a que las actividades agropecuarias del Istmo Centroamericano son altamente dependientes del clima, en particular de la precipitación, su vulnerabilidad es elevada. El área cultivada bajo riego es apenas 2,4% del total. A su vez, estas actividades productivas afectan al clima y al ambiente mediante la emisión de metano, la contaminación de acuíferos, la erosión, la salinización de los suelos y la deforestación para el uso del suelo agropecuario.

En este capítulo se examina la situación actual del sector agropecuario, a partir de la cual se estimarán los posibles efectos del cambio climático en las próximas décadas.

1. El aporte agropecuario y rural a la economía centroamericana

La agricultura y ganadería constituyen uno de los principales motores de la economía del Istmo Centroamericano; si se incluye a la agroindustria, representa 18% del PIB total. Además, son los principales abastecedores de alimentos y producen 35% de las exportaciones de bienes del Istmo. El sector agropecuario y el medio rural brindan gran parte del empleo, y el agro es un importante generador de ingresos para los hogares rurales. Su población migrante envía un flujo considerable de remesas, buena parte de los 13.000 millones de dólares que actualmente ingresan.

Las vinculaciones del sector con el resto de las actividades económicas lo hace una de las principales fuentes de crecimiento de la economía, ya que contribuye a dinamizar la industria, el comercio, el transporte y los servicios financieros. Además, es el núcleo más importante de las demás actividades rurales. Los excedentes generados en la agricultura se convierten en ahorros e inversión para otros sectores y son fuente de ingresos tributarios. Como se comenta adelante, el medio rural también produce valiosos servicios ambientales, como: mitigación de emisiones, agua para riego, consumo urbano y generación de electricidad y servicios de ecoturismo, entre otros.

Con todo, la producción crece poco y los rendimientos y la competitividad son bajos. Por ejemplo, durante los últimos siete años el crecimiento agropecuario por habitante ha sido modesto (2,8%). La productividad de los principales productos de exportación —café, banano, caña de azúcar— y la de los granos básicos —maíz, frijol y arroz—, ha sido muy baja debido, entre otros factores, a la escasa capitalización del agro, a los daños derivados de fenómenos climáticos y a la emigración del capital humano. En el caso del maíz, que ocupa la mayor área cosechada —1,7 millones de hectáreas—, sus rendimientos representan menos del 50% del promedio mundial.

Los factores anteriores y la relativamente escasa innovación han incidido adversamente en la competitividad externa. En efecto, la competitividad de las exportaciones del Istmo no es elevada. De 25 grupos de productos agropecuarios y agroindustriales analizados para los países del Istmo en el lapso

2000-2007, sólo un país tiene cerca de 50% en la categoría de estrellas nacientes⁴. En los otros seis países sus productos clasificados como estrellas nacientes están por debajo o igual al 40%. Todos los otros productos se encuentran en mercados estancados o dinámicos, pero en los que pierden participación (véase el cuadro 1).

Los relativamente bajos niveles de competitividad y de productividad reflejan la tendencia, en 1995-2007, a una tasa reducida de inversión en la agricultura y el medio rural. Los sectores agropecuarios del Istmo sufrieron una pérdida de capitales financieros, físicos, naturales y humanos en las dos últimas décadas, con obvias diferencias entre países y entre actividades dinámicas y rezagadas. Las tendencias adversas están asociadas a la baja rentabilidad —precios reales menores e impactos de producción en ascenso—; a la reducción relativa del financiamiento, del gasto público y de la cooperación internacional; a la destrucción del capital natural y físico y, de manera importante, al descuido del capital humano.

2. Servicios ambientales de la agricultura y del medio rural

Desde hace más de una década en el Istmo Centroamericano se trabaja en reconocer, valorar y aprovechar los servicios ambientales producidos en el medio rural y, en particular, en las actividades agropecuarias. En el Istmo se producen diversos servicios ambientales, incluyendo los siguientes⁵:

a) La **mitigación de las emisiones de gases** con efecto invernadero, mediante la fijación, reducción y almacenamiento de CO₂. El Istmo cuenta con una cobertura boscosa de 21,5 millones de hectáreas y un área cultivada de 17,9 millones de hectáreas que realizan un importante servicio de captura de CO₂.

b) La **conservación de la biodiversidad**, mediante la protección y uso sostenible de especies, conservación de los ecosistemas y los procesos ecológicos, de los cuales se deriva la diversidad biológica y el acceso a la biodiversidad para fines científicos y comerciales.

c) La **protección de recursos hídricos**, en calidad, distribución en el tiempo y cantidad, para uso urbano, rural, industrial e hidroeléctrico, mediante la protección y el uso sostenible de fuentes de agua en general, acuíferos y manantiales, protección y recuperación de cuencas y microcuencas. La generación hidroeléctrica representa 50% de la producción total.

d) La **belleza escénica** de bosques, paisajes naturales y elementos de la biodiversidad, atractivos y la base para el desarrollo del turismo de playa y sol, turismo científico, de observación, ecoturismo y de aventura. Por último, los bosques, humedales, arrecifes y manglares, **mitigan los impactos de los desastres** causados por las inundaciones, derrumbes y sequías, asociados con fenómenos naturales.

⁴ Productos que ganan participación en mercados dinámicos.

⁵ Véase: Espinoza, Gatica y Smyle (1999).

Cuadro 1
ISTMO CENTROAMERICANO: COMPETITIVIDAD DE LAS EXPORTACIONES
AGROALIMENTARIAS A LOS ESTADOS UNIDOS, 2000-2007
(Tipología de los productos)

Código	Productos	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala
Agropecuarios					
1	Animales vivos	No definido	Retirada	Estrella Menguante	Retirada
2	Carne bovina fresca y refrigerada	No definido	Retirada	Estrella Menguante	No definido
3	Peces vivos	Retirada	Retirada	Retirada	Retirada
4	Lácteos y miel	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente
5	Demás productos de origen animal	No definido	Estrella Menguante	Retirada	Estrella Menguante
6	Plantas y flores	Estrella Menguante	Estrella Menguante	Retirada	Retirada
7	Legumbres y hortalizas	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Estrella Naciente
8	Frutos comestibles	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida
9	Café sin tostar, té, yerba mate y especias	Retirada	Retirada	Retirada	Retirada
10	Cereales	No definido	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente
12	Semillas y frutos oleaginosos	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida
Agroindustriales					
11	Productos de la molinería	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida
13	Gomas y resinas	No definido	Estrella Menguante	Estrella Menguante	No definido
14	Materias trenzables y demás productos	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida
15	Grasas y aceites animales o vegetales	No definido	No definido	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente
16	Preparaciones de carne	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente
17	Azúcares y artículos de confitería	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente
18	Cacao y sus preparaciones	No definido	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida
19	Preparaciones a base de cereales	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente
20	Preparación de legumbres, hortalizas y frutas	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Estrella Naciente
21	Preparaciones alimenticias diversas	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente
22	Bebidas, líquidos alcohólicos	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente
23	Alimentos balanceados y residuos	No definido	Estrella Naciente	No definido	No definido
24	Tabaco y sucedáneos del tabaco	Retirada	Retirada	No definido	Retirada
44	Madera y manufacturas de madera	Retirada	Retirada	Retirada	Estrella Menguante
		Honduras	Nicaragua	Panamá	
Agropecuarios					
1	Animales vivos	Retirada	Retirada	Estrella Menguante	
2	Carne bovina fresca y refrigerada	Retirada	Estrella Menguante	No definido	
3	Peces vivos	Retirada	Retirada	Retirada	
4	Lácteos y miel	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	
5	Demás productos de origen animal	Retirada	Estrella Menguante	Retirada	
6	Plantas y flores	Retirada	Retirada	Retirada	
7	Legumbres y hortalizas	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	
8	Frutos comestibles	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	
9	Café sin tostar, té, yerba mate y especias	Retirada	Estrella Menguante	Retirada	
10	Cereales	Estrella Naciente	No definido	No definido	
12	Semillas y frutos oleaginosos	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	
Agroindustriales					
11	Productos de la molinería	No definido	Estrella Naciente	Estrella Naciente	
13	Gomas y resinas	Estrella Menguante	No definido	Estrella Menguante	
14	Materias trenzables y demás productos	No definido	No definido	No definido	
15	Grasas y aceites animales o vegetales	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	No definido	
16	Preparaciones de carne	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	
17	Azúcares y artículos de confitería	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	
18	Cacao y sus preparaciones	Oportunidad Perdida	No definido	Oportunidad Perdida	
19	Preparaciones a base de cereales	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente	
20	Preparación de legumbres, hortalizas y frutas	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	Estrella Naciente	
21	Preparaciones alimenticias diversas	Estrella Naciente	Oportunidad Perdida	Oportunidad Perdida	
22	Bebidas, líquidos alcohólicos	Estrella Naciente	Estrella Naciente	Estrella Naciente	
23	Alimentos balanceados y residuos	No definido	No definido	Estrella Naciente	
24	Tabaco y sucedáneos del tabaco	Estrella Menguante	Estrella Menguante	Retirada	
44	Madera y manufacturas de madera	Retirada	Estrella Menguante	Estrella Menguante	

Fuente: CEPAL, sobre la base de cifras del Módulo para Analizar el Crecimiento del Comercio Internacional (MAGIC).

3. El Istmo Centroamericano ante el cambio climático

a) Los efectos del cambio climático en la agricultura, en los últimos años

Los últimos 40 años se han intensificado los eventos extremos con consecuencias adversas para el sector agropecuario. Esta tendencia ha sido más acentuada en la década actual. Una estimación de los daños y pérdidas totales⁶, debido a los principales eventos ocurridos entre 1972-2007, arroja un total de casi 11.000 millones de dólares, equivalente a 5,7% del PIB centroamericano en 2007. Cerca del 60% de ese valor constituyeron los efectos desastrosos del huracán Mitch en 1998, mayormente concentrados en Honduras (véase el cuadro 2).

En el período considerado el sector agropecuario sufrió pérdidas y daños por 3.702 millones de dólares. Una muy grave consecuencia fue la destrucción de capital físico (2.072 millones de dólares), cuya formación ha sido tendencialmente lenta en el sector.

b) Las estrategias, políticas y programas frente al cambio climático

En Guatemala los presidentes centroamericanos en octubre de 1999 declararon el quinquenio 2000-2004 de “Reducción de las Vulnerabilidades y del Impacto de Desastres” por medio de la prevención y la mitigación. En el contexto anterior, la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y el Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC) han venido trabajando en iniciativas relacionadas con los efectos del cambio climático en la agricultura del Istmo Centroamericano.

En 2005 la CCAD aprobó el Plan Ambiental de la Región Centroamericana (PARCA) 2005-2010 (CCAD, 2005) como herramienta estratégica para enfrentar los retos ambientales. El Plan incluye un apartado sobre adaptación y mitigación al cambio climático. Para elevar la capacidad de adaptación se propone trabajar en la gestión de ecosistemas priorizados a fin de mitigar los cambios climáticos y reducir el riesgo y la vulnerabilidad.

Posteriormente, la Comisión aprobó, en abril de 2008, los **Lineamientos de la Estrategia Regional de Cambio Climático**, en los que se propone evaluar la vulnerabilidad de los sistemas de producción agropecuarios, forestales y pesqueros ante los impactos del cambio climático y desarrollar estrategias para enfrentarlo. Asimismo, se busca fortalecer las iniciativas nacionales y regionales de gestión sostenible de los ecosistemas forestales y costero-marinos, y las cuencas hidrográficas con objeto de combatir la degradación de suelos, las sequías y el cambio inapropiado del uso de suelos (CCAD, 2008).

Los Lineamientos incluyen cuatro áreas programáticas: vulnerabilidad y adaptación; mitigación; desarrollo institucional y de capacidades; educación, concienciación y sensibilización pública, y gestión internacional. A partir de éstos se está formulando la Estrategia Regional de Cambio Climático.

⁶ Se refiere a la destrucción total o parcial del acervo o capital, así como a las pérdidas o alteraciones de los flujos

Cuadro 2
ISTMO CENTROAMERICANO: DAÑOS Y PÉRDIDAS EN EL SECTOR AGROPECUARIO POR LOS DESASTRES, 1972-2008
(En millones de dólares)

Evento	Daños y pérdidas totales	Agropecuario			Porcentaje con relación a los daños y productos totales			PIB corriente de cada año	Daños y pérdidas totales/PIB
		Total	Daños	Pérdidas	Agropecuario/total	Daños/agropecuario	Pérdidas/agropecuario		
Gran total	10 892,8	3 702,1	2 071,7	1 630,4	34,0	56,0	44,0	192 293,5	5,7
1972 Terremoto - Nicaragua	772,0	...	...	...	...	...	...	878,6	87,9
1974 Huracán Fifi - Honduras	207,9	69,5	69,5	...	33,4	100,0	-	1 034,5	20,1
1976 Terremoto - Guatemala	1 152,0	10,5	10,5	...	0,9	100,0	-	4 365,3	26,4
1982 Terremoto - El Salvador	128,5	87,5	74,4	13,1	68,1	85,0	15,0	3 399,2	3,8
1982 Inundaciones - Nicaragua	354,0	109,7	78,1	31,6	31,0	71,2	28,8	2 454,5	14,4
1983 Lluvias atípicas - Nicaragua	350,0	125,0	85,0	40,0	35,7	68,0	32,0	2 753,1	12,7
1998 Mitch - Centroamérica	6 008,5	2 936,7	1 679,7	1 257,0	48,9	57,2	42,8	54 272,7	11,1
Costa Rica	91,1	62,4	25,9	36,5	68,5	41,5	58,5	14 095,9	0,6
El Salvador	388,1	158,3	111,7	46,6	40,8	70,6	29,4	12 008,4	3,2
Guatemala	748,0	499,4	187,6	311,8	66,8	37,6	62,4	19 393,7	3,9
Honduras	3 793,6	2 031,4	1 226,2	805,2	53,5	60,4	39,6	5 202,2	72,9
Nicaragua	987,7	185,2	128,3	56,9	18,8	69,3	30,7	3 572,5	27,6
Sequía - Istmo Centroamericano	189,1	110,5	-	110,5	58,4	-	100,0	71 792,1	0,3
Costa Rica	8,8	-	-	-	-	-	-	16 403,6	0,1
El Salvador	31,4	25,5	-	25,5	81,2	-	100,0	13 812,7	0,2
Guatemala	22,4	12,3	-	12,3	54,9	-	100,0	18 701,4	0,1
Honduras	51,5	32,3	-	32,3	62,7	-	100,0	7 566,5	0,7
Nicaragua	48,7	29,1	-	29,1	59,8	-	100,0	4 102,7	1,2
Panamá	26,3	11,3	-	11,3	43,0	-	100,0	11 205,1	0,2
2002 Huracán Keith - Belice	280,1	62,2	38,7	23,4	22,2	62,3	37,7	932,2	30,0
2005 Tormenta Stan - El Salvador	355,6	48,7	21,6	27,1	13,7	44,4	55,6	17 070,2	2,1
2005 Tormenta Stan - Guatemala	988,3	77,7	23,5	54,2	7,9	30,3	69,7	27 270,7	3,6
Huracán Felix- RAAN y Ondas tropicales 35 y 36 y La Vaguada - Nicaragua	297,0	68,3	8,1	60,2	23,0	11,9	88,1	5 725,9	5,2
2007 Huracán Dean - Belice	89,9	57,9	21,2	36,7	64,4	36,7	63,3	1 276,8	7,0

Fuente: CEPAL, sobre la base de cifras oficiales de la Base de Datos de la Unidad de Desastres.

El CAC en su **Política Agrícola Centroamericana 2008-2017** incluye un apartado de Gestión Ambiental, en el cual se propone la formulación de una Estrategia Regional Agroambiental, que promueva procesos productivos que sustenten la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental, social y económica, contribuyendo a la reducción de la pobreza de la población; e incorporar el manejo de los recursos naturales para consolidar el Corredor Biológico Mesoamericano (CCAD, 2007).

La Estrategia Regional es concebida como una plataforma regional de colaboración de los sectores agrícola, ambiental y de salud, para la armonización de políticas y de agendas comunes,

focalizadas en cuatro ejes estratégicos: manejo sostenible de tierras, cambio climático y variabilidad climática, biodiversidad y negocios verdes (CAC, 2007).

Asimismo, el CAC desde inicios de los años 2000 ha venido proponiendo acciones para enfrentar los efectos del cambio climático, en particular de las sequías. La Estrategia para el manejo de la sequía en el sector agropecuario de Centroamérica incluyó como su objetivo reducir la vulnerabilidad y el impacto de las sequías en el sector agropecuario centroamericano. Para ello, se propone mejorar el conocimiento acerca de las causas y posibilidades de influir sobre las sequías. Adaptar la agricultura centroamericana en respuesta al calentamiento global y a la tendencia a la desertificación. La Estrategia incluye las siguientes áreas estratégicas: fortalecimiento institucional, información y comunicación, ciencia y tecnología, educación y capacitación, financiamiento y cobertura de riesgos, cooperación internacional, seguridad alimentaria y comercio (CAC, 2002).

A la fecha existe relativamente poca información y evaluaciones de los efectos de estos programas y estrategias, en algunos casos explicado por lo reciente de estas medidas.

III. METODOLOGÍAS

El clima es un determinante básico de la productividad agrícola, es fundamental entender y estimar los efectos del cambio climático en el sector agrícola, ya que puede afectar los tipos de cultivos, su producción y las frecuencias e intensidad de las cosechas. Sin embargo, esto es complejo si se considera que diferentes variables pueden interferir y que el ser humano tiende a adaptar su comportamiento ante los cambios (Adams y otros, 1998; Maddison, Manley y Kurukulasuriya, 2007).

Como se comentó anteriormente, un enfoque que ha sido utilizado trAdemás para estimar los efectos físicos y económicos del cambio climático sobre la agricultura es el de la función de producción, el cual estima los impactos alterando una o más variables, como la precipitación o temperatura.

De acuerdo con Mendelsohn, Nordhaus y Shaw (1994), este enfoque puede llevar a sobrestimar los efectos negativos del clima, ya que no considera una variedad de ajustes que los productores realizan en respuesta a cambios en las condiciones económicas y ambientales; por ejemplo, la adaptación a los cambios tecnológicos y ambientales, modificaciones en la producción de alimentos, en los precios de los insumos o en la disponibilidad de recursos. Así, los resultados de la función de producción, con frecuencia, predicen severas reducciones en los rendimientos de los cultivos como resultado del cambio climático.

No obstante, el enfoque en cuestión tiene la ventaja de permitir el análisis de efectos sobre diferentes cultivos y, al basarse en escenarios climáticos confiables, arroja resultados claros en términos de la relación entre los rendimientos de los mismos y las condiciones climáticas. Además, permite identificar los umbrales de temperatura y precipitación, así como los valores máximos más allá de aquéllos donde las condiciones climáticas se vuelven perjudiciales.

Otra metodología mediante la cual se puede, en principio, corregir el posible sesgo en las estimaciones basadas en la función de producción es la del “enfoque Ricardiano”, que permite analizar cómo el clima afecta al valor neto de las tierras cultivadas. Al medir directamente los precios agrícolas o ganancias se consideran los impactos directos del clima en los diferentes cultivos, así como la sustitución de diversos insumos, la introducción de varias actividades y otras adaptaciones potenciales a climas distintos (Mendelsohn, Nordhaus y Shaw, 1994). Este modelo proporciona una herramienta para analizar cómo los agricultores tienen la posibilidad de responder a futuros cambios en el clima mediante la búsqueda de una mayor renta de la tierra (diferentes usos de la tierra). Sin embargo, no permite conocer los efectos sobre cultivos específicos.

Dadas las ventajas y desventajas de los dos enfoques, se consideran complementarios. A diferencia de muchos estudios que utilizan sólo uno de ellos, en éste se emplearán ambos enfoques, considerando sus limitaciones y tratando de obtener el mayor provecho de cada uno.

La función de producción servirá para estudiar los efectos del cambio climático sobre la producción y los rendimientos de diferentes cultivos, mientras que el enfoque Ricardiano permitirá analizar los efectos sobre el valor de la tierra. A continuación se describen ambas técnicas.

1. Enfoque de la función de producción

En teoría, una función de producción es aquella que relaciona las cantidades de factores que se requieren (X) y la forma en que se combinan para producir un bien determinado (Y).

$$Y = f(X) \quad (1)$$

Si se sigue a Fleischer, Lichtman y Mendelsohn (2007), una función de producción agrícola (Q) se puede expresar con base en variables endógenas, exógenas y de variables que representan la habilidad o capacidad de los agricultores. Las variables endógenas (\mathbf{x}) incluyen trabajo, capital, fertilizantes y otros insumos. Las exógenas (\mathbf{z}) comprenden variables climáticas. Las características de los agricultores (\mathbf{m}) incluyen variables de capital humano.

En términos formales, la función de producción agrícola se representa de la siguiente forma:

$$Q_t = f(m_t, z_t, x_t) \quad (2)$$

donde Q_t representa la producción agropecuaria o el rendimiento por hectárea de un producto determinado y el subíndice t indica el tiempo o el año considerado.

Así, la función de beneficios de un agricultor que produce n cultivos en el tiempo t se expresa de la forma:

$$\pi_t = \sum_{j=1}^n [p_j Q_{j_t}(m_t, z_t, x_{jt}) - w_t x_{jt}], \quad j=1, 2, \dots, n \text{ cultivos} \quad (3)$$

donde p_j representa los precios del producto j y w los precios de los insumos del producto j .

Un supuesto subyacente en este enfoque es que los agricultores buscan maximizar sus beneficios y, por lo tanto, eligen aquella cantidad de insumos (\mathbf{x}) que se los permita, considerando como dadas a las variables exógenas como el clima. La cantidad óptima de insumos debe satisfacer la siguiente condición de primer orden en cada uno de los períodos considerados:

$$p_j \frac{\partial Q}{\partial x_t} = w, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

En este estudio, y a partir del enfoque de funciones de producción descrito anteriormente, se analizan, en primer lugar, los efectos del cambio climático sobre la producción agropecuaria (a través de índices de producción) en cuatro grandes grupos: producción agropecuaria, producción de cultivos, producción de cereales y producción pecuaria. De esta forma y con objeto de realizar la estimación econométrica de la ecuación (2) para cada uno de los índices de producción, es posible representar dicha función mediante las siguientes ecuaciones:

$$Agropecuaria_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (5)$$

$$Cultivos_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (6)$$

$$Cereales_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (7)$$

$$Pecuaria_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (8)$$

Asimismo, y en segundo lugar, este estudio presenta un análisis de los efectos del cambio climático sobre el rendimiento de tres productos agrícolas: maíz, frijol y arroz. Para estos cultivos, las ecuaciones a estimar se representan de la siguiente forma:

$$Maiz_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (9)$$

$$Frijol_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (10)$$

$$Arroz_{it} = f(m_{it}, z_{it}, x_{it}), \quad i=1, \dots, N, \text{ países} \quad t=1, \dots, T \quad (11)$$

Para la estimación de la función de producción se elige, por lo general, una forma funcional cuadrática, con el fin de poder identificar los niveles a los que el clima (temperatura y precipitación) tiene efectos positivos o negativos sobre la producción. Una vez estimadas las funciones de producción, es posible calcular el impacto sobre las distintas variables dependientes (índices de producción o rendimientos de cultivos) ante las variaciones de uno o más factores, como podrían ser: temperatura y precipitación. De esta manera, es posible obtener estimaciones de la producción o rendimiento máximo por cultivo y los valores óptimos de cada uno de los factores que determinan la producción o rendimiento de los cultivos.

La estimación de la función de producción para el caso de los cuatro índices de producción se llevó a cabo utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). En el caso de la estimación sobre los rendimientos de los productos (maíz, frijol y arroz) se usó la metodología de efectos fijos, esto con el fin de explotar las ventajas que tienen las estimaciones basadas en datos de panel, entre las cuales, de acuerdo con Baltagi (2005), se encuentran las siguientes: a) permiten controlar por la heterogeneidad individual; b) los datos de panel aportan un mayor volumen de información, con más variabilidad, poca colinealidad, más grados de libertad y mayor eficiencia; c) permiten estudiar de mejor manera la dinámica de los ajustes, y d) se pueden detectar efectos no observables con series de tiempo y corte transversal, por separado.

En última instancia, el método de estimación para los datos de panel dependerá de las suposiciones que se tengan con respecto al parámetro de intersección, los coeficientes de las pendientes y el término de error.

Con el fin de considerar el carácter individual de cada país se permite que el coeficiente de intersección varíe a través de los países, manteniendo los coeficientes de pendiente constantes. Este modelo es conocido como de *efectos fijos* y se emplea como se dijo anteriormente para el caso de los productos (maíz, frijol y arroz).

Una vez calculada la función de producción, se estima el impacto de las variaciones de uno o más factores, como temperatura, precipitación, niveles CO₂, entre otros. De esta manera, se pueden obtener estimaciones de la producción o rendimiento máximo por cultivo y los valores óptimos de cada uno de los factores que determinan la producción o rendimiento de los cultivos.

Las variables climáticas, que son exógenas, cumplen un papel importante al determinar el rendimiento de los productos cultivados o el valor de los mismos. Por ejemplo, mayores niveles de temperatura conllevan aumentos en la demanda de agua necesaria para el crecimiento de las plantas y, en consecuencia, pueden incrementar o disminuir la producción de un cultivo determinado. La precipitación desempeña un papel diferente, dependiendo si se trata de áreas irrigadas o no. En áreas que no cuentan con riego, el agua necesaria para los cultivos proviene directamente de la precipitación, antes y durante la época de crecimiento.

Las plantas se desarrollan dependiendo de su exposición a la humedad y temperatura durante su etapa de crecimiento. Los factores climáticos están relacionados con etapas importantes de la fonología de las plantas, por ejemplo, precipitación con germinación y floración y temperatura con desarrollo y maduración del fruto.

Si bien la función de producción no captura por completo la adaptación y estrategias de mitigación de los agricultores para enfrentar el cambio climático, tiene la ventaja de arrojar resultados auténticos en términos de la relación entre rendimientos y condiciones climáticas, relación que es de interés para los propósitos de esta investigación. Además, tiene la ventaja de que al basarse directamente en variables observadas, la relación de variables climáticas y rendimientos agrícolas también se estima directamente.

2. Enfoque Ricardiano

Los efectos que el cambio climático ha tenido en el pasado sobre la productividad agrícola pueden ser medidos y cuantificados. Con el desarrollo de un modelo de valuación ambiental, Mendelsohn (2007) estima que el cambio climático durante el período 1960 a 2000 ha causado un incremento de 2% a 4% en la producción agrícola global. Señala que el futuro cambio climático puede llegar a ser benéfico hasta cierto punto, un aumento en la temperatura de 2,5° C, a partir del cual los efectos empezarán a ser negativos. El análisis Ricardiano, como se describe a continuación, documenta este pronóstico.

El modelo Ricardiano fue desarrollado para explicar la variación del valor de la tierra entre diferentes zonas climáticas (Mendelsohn, Nordhaus y Shaw, 1994); además, ha sido uno de los enfoques líderes en el análisis de los efectos directos del cambio climático en la productividad agrícola.

El modelo Ricardiano es un análisis de sección cruzada que ha sido ampliamente aplicado en el estudio de los efectos del cambio climático en la productividad agrícola. Debe su nombre a David Ricardo, quien hizo la observación de que el valor de la tierra muestra su productividad neta por el ingreso neto de la tierra (π). Se asume que los productores agrícolas maximizan el ingreso neto (π) dado por la siguiente ecuación:

$$\pi = \sum p_i Q_i(m, z, x) - \sum w_x x \quad (12)$$

donde p_i es el precio de mercado del cultivo i , x un vector de insumos, w_x el vector de precios de los insumos, z un vector de variables climáticas y m representa un vector de otras variables que afectan la producción del cultivo i . Los productores eligen x para maximizar el ingreso neto de cada cultivo, dadas las características intrínsecas a la unidad de producción (temperatura, precipitación, tipo de suelo, acceso a mercados, entre otros) y el precio de mercado de los productos. La función óptima resultante es:

$$\pi^* = f(p_i, m, z, w_x) \quad (13)$$

El modelo Ricardiano utiliza la especificación anterior para determinar la manera en que los cambios en variables exógenas contenidas en z y m afectan la productividad neta de la tierra. El valor de la tierra (LV) es entonces el valor presente del flujo de ingresos netos:

$$LV = \int_0^{\infty} \pi_t^* \cdot e^{-rt} dt \quad (14)$$

donde r representa la tasa de interés del mercado.

Hay dos maneras de estimar el modelo Ricardiano. La primera consiste en utilizar el valor de la tierra como variable dependiente y la segunda es usar el ingreso neto agrícola o ganancias netas agrícolas como variable dependiente. Ambas alternativas han sido utilizadas y dependen en gran medida de la disponibilidad de datos. Sin embargo, el valor de la tierra se considera una mejor medida, pues refleja la expectativa de ingresos en un horizonte de varios años, en tanto que el ingreso neto agrícola sólo ofrece un resultado anual que puede variar años tras año. Dado que el cambio climático es un fenómeno de largo plazo, se esperaría que sus efectos estuvieran mejor reflejados en una variable como el valor de la tierra. En cambio, el ingreso neto agrícola estará afectado, más bien, por fenómenos climáticos del año al que se haga referencia, un plazo muy corto para asociar cualquier resultado al cambio climático.

Si se sigue a Seo y Mendelsohn (2008a), el modelo anterior puede estimarse econométricamente de la siguiente forma:

$$LV = \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot T^2 + \beta_3 \cdot P + \beta_4 \cdot P^2 + \beta_5 T \cdot P + \sum_j \lambda_j \cdot m_j + e \quad (15)$$

donde la variable dependiente es el valor de la tierra por hectárea, T y P representan temperatura y precipitación, respectivamente. En la práctica, es común hacer una distinción entre temperaturas y precipitaciones en diferentes estaciones del año, m representa un conjunto de variables socioeconómicas relevantes, β_k y λ_j son parámetros a ser estimados y e es el término de error.

Los términos cuadráticos reflejan que la respuesta del valor de la tierra, dada a través de la función ricardiana LV , a cambios en variables climáticas puede ser no lineal. Por ejemplo, a bajos niveles de temperatura, la decisión óptima del productor puede ser cultivar trigo; no obstante, conforme la temperatura aumenta, la rentabilidad marginal del trigo es decreciente hasta alcanzar un punto en el que se vuelve negativa. Es entonces cuando el productor puede tomar, como decisión óptima, la adopción de un nuevo cultivo adaptable a temperaturas mayores. Un razonamiento similar puede aplicarse a cultivos sensibles a la precipitación pluvial. Al seguir esta lógica, el modelo Ricardiano asume un comportamiento adaptativo de los productores a lo largo del ciclo productivo intertemporal (Mendelsohn, Nordhaus y Shaw, 1994).

De esta forma, el cambio en el valor de la tierra debido a un cambio marginal en alguna de las variables climáticas, temperatura (T) por ejemplo, esta dado por:

$$\frac{\partial LV_i}{\partial T} = \beta_1 + 2 \cdot \beta_2 \cdot T + \beta_5 \cdot P \quad (16)$$

El resultado es análogo para las variables de precipitación. De manera adicional y si la disposición de información lo permite, la modelación anterior hace posible la diferenciación de los impactos del cambio climático mediante distintos perfiles de productores, lo que permite determinar

diferentes niveles de sensibilidad. El efecto anual de un cambio marginal de la variable climática en cuestión es la suma de los efectos marginales de dicha variable en cada estación del año.

El cambio en el valor de la tierra como resultado del cambio de escenario climático C_0 a C_1 está dado por:

$$\Delta LV = LV(C_1) - LV(C_0) \quad (17)$$

Esto es, una vez estimada la relación funcional del valor de la tierra y las variables climáticas, basta evaluar la función ricardiana en uno y otro escenario climático para obtener el monto monetario por el cual el valor de la tierra, o flujo neto de ingresos, será afectado. Si $\Delta LV < 0$, hay evidencias de efectos negativos del cambio climático en la rentabilidad agrícola.

Las principales críticas al modelo Ricardiano radican en el uso de la estática comparada. El resultado de la ecuación (15) se basa en el supuesto de que el resto de las variables explicativas (por ejemplo, sociodemográficas) no cambian entre los escenarios C_0 y C_1 . Se asume, por ejemplo, que cualquier cambio en los niveles de educación entre $t = 0$ y $t = 1$ no tendrá efectos en la productividad de la tierra. Se ha señalado también la falta de inclusión, en el análisis, de las modificaciones en los precios agrícolas. Finalmente, el modelo de análisis Ricardiano tampoco incluye medidas por parte de los productores con relación al costo de adaptación al cambio climático.

IV. EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL SECTOR AGROPECUARIO

El desarrollo de las plantas está directamente influido por las diferencias climáticas en las distintas zonas geográficas del mundo. Sin embargo, su desarrollo y crecimiento en un lugar determinado varía de un año a otro como respuesta a las diferencias en el clima local.

El cambio climático produce fenómenos climáticos extremos. Asimismo, genera cambios importantes en la temperatura y en la precipitación. Durante el crecimiento de los cultivos la temperatura y la humedad del suelo desempeñan un papel determinante. Cuando los suelos están húmedos, la temperatura es usualmente el factor ambiental determinante en la velocidad de germinación. Por otra parte, la temperatura afecta muchos aspectos del crecimiento incluyendo el desarrollo de los sistemas reticulares, la velocidad a la que absorben agua y nutrientes, el desarrollo y expansión de las hojas, la floración y el rendimiento (Wild, 1992).

Aumentos en la temperatura pueden tener efectos positivos o negativos sobre el rendimiento de los cultivos. La diferencia depende de la ubicación y magnitud de dichos cambios (Adams, Hurd y Reilly, 1999). Por ejemplo, algunos cultivos pueden resultar beneficiados al existir menores heladas. Sin embargo, las altas temperaturas facilitan la existencia de insectos y enfermedades en las plantas, agravando el riesgo de la pérdida de los cultivos. Los cambios en la precipitación dañan directamente la humedad del suelo y, por lo tanto, la producción de alimentos.

Por su parte, el cambio climático tiene efectos directos sobre la producción pecuaria, como los incrementos en la temperatura, que se relacionan directamente con la mortandad de los animales, y efectos indirectos, como la disponibilidad de alimentos y el alza en los precios de los granos generados por sequías.

Por otro lado, una mayor cantidad de CO₂ en la atmósfera puede impulsar la productividad agrícola hasta un cierto nivel, ya que este compuesto es un elemento indispensable en la fotosíntesis de las plantas. El CO₂ estimula la fotosíntesis en determinadas plantas⁷. En presencia de CO₂, las plantas C₃, que contribuyen con el suministro mundial de alimentos, fijan el CO₂ si el agua es abundante⁸ o si los niveles de luz son bajos (Audesirk, 2003). Por su parte, dadas las mismas condiciones, las plantas C₄ aprovechan mejor el CO₂ cuando la energía luminosa es abundante y no así el agua; estas plantas incluyen cultivos tropicales como el maíz, sorgo y la caña de azúcar, que son importantes para la seguridad alimentaria de los países latinoamericanos.

No obstante, los efectos positivos ocasionados por el aumento de CO₂ pueden reducirse por cambios en la temperatura y la precipitación, así como por incrementos en plagas, maleza y variaciones en la disponibilidad de nutrientes en el suelo (PNUMA y UNFCCC, 2004).

⁷ La diferencia entre las plantas C₃ y C₄ se debe al tipo de fotosíntesis (fijación de carbono) que llevan a cabo. Las plantas C₃ representan más del 95% de las especies vegetales del planeta (incluyen gran parte de las especies de cultivos, como el trigo, el arroz, la cebada y el frijol). Florecen en climas fríos, húmedos y nublados, donde los niveles de luz pueden ser bajos, debido a que su metabolismo es más eficiente. Las plantas C₄ habitan en ambientes secos con elevadas temperaturas. Tienen muy alta eficiencia del uso del agua. Aun cuando menos del 1% de las especies vegetales de la tierra pueden ser clasificados como C₄, representan el 20% de la productividad primaria bruta.

⁸ Ya que los estomas de las plantas se mantienen abiertos y permiten el ingreso abundante de CO₂.

1. Impacto en las funciones de producción agropecuaria

En el presente análisis, mediante el enfoque de la función de producción, se calcula el impacto de los cambios en temperatura y precipitación sobre el sector agropecuario para el período 1961-2005. También se examina el impacto directo de cambios en variables climáticas y emisiones de CO₂ sobre los índices de producción agropecuaria, cultivos, cereales y producción pecuaria.

En su fase inicial, se consideró construir el modelo de la función de producción con la metodología de panel de efectos fijos, con datos anuales para el período 1961-2005 a fin de capturar la heterogeneidad no observable en el tiempo entre los países del Istmo Centroamericano. Sin embargo, para el caso de los índices de producción, se optó por no tomar en cuenta las diferencias entre países o entre períodos temporales y utilizar un *pool* de datos, debido a un mejor ajuste de las variables climáticas. La muestra total para la estimación por medio de MCO consistió en 315 datos (véase el cuadro 3).

Para realizar el análisis, se utilizaron los índices de producción agropecuaria tipo Laspeyres, base 1999-2001, construidos por la FAO⁹, para los siete países del Istmo Centroamericano (véase el anexo I). Los datos meteorológicos (precipitación y temperatura) fueron proporcionados por el Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estos datos corresponden a información de temperatura y precipitación anuales por país. Los niveles de emisión del sector energía de CO₂¹⁰ se utilizaron como un proxy de la concentración total de CO₂¹¹ (véase el anexo II). Por otra parte, se incluyeron algunas variables de control como PIB (información de CEPAL) y población (información de CELADE). Los datos de la superficie de tierra arable y cultivos permanentes, la superficie de tierra bajo riego, la PEA rural y la PEA total provienen de la base FAOSTAT¹².

a) Resultados

Las ecuaciones de funciones de producción regionales fueron estimadas para cuatro índices de producción agropecuaria (producción agropecuaria en su conjunto, de cultivos, de cereales y pecuaria). Las variables explicativas incluyen variables climáticas (temperatura máxima anual y precipitación

⁹ Los índices FAO de producción agropecuaria muestran el nivel relativo del volumen global de producción agropecuaria para cada uno de los años, en comparación con el período base 1999-2001. Están sustentados en la suma de las cantidades a precios ponderados de los diferentes productos agropecuarios producidos, después de la deducción de las cantidades utilizadas para semillas y alimentación de los animales, ponderadas del mismo modo. El agregado resultante representa la producción disponible para cualquier utilización, exceptuadas las semillas y la alimentación de los animales. Todos los índices se calculan por la fórmula Laspeyres. Las cantidades de producción de cada producto son ponderadas por la media de los precios internacionales de los productos para el período base 1999-2001 y sumadas para cada año.

¹⁰ Datos provenientes de “*The Climate Analysis Indicators Tool (CAIT)*”. Se utilizaron emisiones de CO₂ por contar con una serie histórica desde 1961 para cada uno de los países analizados.

¹¹ Como un ejercicio adicional, se realizaron dos estimaciones incluyendo emisiones de CO₂ y precipitación en el cálculo de los índices agropecuarios. En ellas se excluyó la temperatura para eliminar la posible existencia de colinealidad entre las variables. Las estimaciones se realizaron con el fin de mostrar el posible efecto del CO₂ sobre la producción agropecuaria. Debido a la inexistencia de series históricas de concentraciones de CO₂ por país, se utilizaron series de emisiones. Por tal motivo, es importante considerar que los resultados pueden no ser concluyentes y se recomienda que sean tomados sólo como ilustrativos.

¹² FAO, División de Estadísticas.

acumulada en los meses de mayo a octubre¹³. Se incluyeron términos cuadráticos para estas variables con el objetivo de captar su efecto no lineal sobre los índices de producción. De igual manera, se consideraron variables independientes como población y la participación de la PEA rural en la PEA total en todos los índices. Al mismo tiempo, se incorporaron las variables superficie de tierra arable y cultivos permanentes y superficie de riego en las regresiones de cultivos y cereales, así como la variable de PIB en los índices de cereales y pecuario.

Cuadro 3
ISTMO CENTROAMERICANO: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA, 1961-2005^a

	Observaciones	Media	Desviación estándar	Valor mínimo ^b	Valor máximo ^b
Índice de producción agropecuaria ^c	315	70	25,75	13	136
Índice de producción de cultivos	315	76,2	28,7	12,0	138,0
Índice de producción de cereales ^d	315	78,6	27,7	5,0	138,0
Índice de producción pecuaria ^e	315	64,4	27,8	18,0	154,0
Maíz ^f	322	1,4	0,5	0,5	3,1
Frijol ^f	322	0,6	0,2	0,2	1,3
Arroz ^f	322	2,6	1,1	0,7	7,5
Superficie arable y cultivos permanentes (miles de hectáreas)	315	984,5	641,1	42,0	2 564,0
Superficie provista de riego (miles de hectáreas)	315	48,7	33,5	1,0	130,0
Participación de la PEA rural en la PEA total	315	0,5	0,1	0,3	0,7
Consumo de carne (toneladas destinadas al consumo alimenticio)	301	70 801,6	53 709,0	2 301,0	291 513,0
PIB (millones de dólares)	315	6 181,0	4 548,2	90,8	19 960,4
Población (miles)	322	3 656,0	2 627,3	96,0	13 018,0
Precipitación acumulada anual (mm)	315	2 373,8	494,7	1 273,7	3 833,6
Precipitación media anual (mm)	322	198,5	41,3	106,1	319,5
Precipitación media anual en los meses de mayo a octubre (mm)	322	297,1	59,8	158,3	495,3
Precipitación media anual en los meses de noviembre a abril (mm)	322	99,9	45,6	7,7	286,5
Temperatura promedio anual (°C)	322	24,7	0,8	22,8	26,2
Temperatura máxima (°C)	315	31,76	1,12	29,13	34,8

Fuente: Elaboración propia.

^a Se refiere a 45 observaciones anuales correspondientes al período 1961-2005 para cada país.

^b Se refiere a observaciones por país.

^c Los productos incluidos en el cálculo de los índices de producción agropecuaria son todos los cultivos y productos de la ganadería producidos en cada país. Prácticamente todos los productos son cubiertos, con excepción de los cultivos forrajeros.

^d Los productos incluidos en el cálculo de los índices de producción de cereales se refieren sólo a los cosechados en grano seco. Los cereales cosechados para heno, o en verde para alimentos, forrajes o ensilaje, o que se utilizan para apacentamiento, están por consiguiente excluidos.

^e Los índices de producción pecuario se calculan a partir de los datos de producción de animales domésticos, que tienen en cuenta el equivalente en carne de animales vivos exportado, pero excluye el equivalente en carne de animales vivos importado. Con vistas a los cálculos de índices, los cambios anuales de números de animales y de aves o de su peso medio en vivo no se toman en consideración.

^f Rendimientos por hectárea.

¹³ Se consideraron mayo a octubre por ser los meses donde se concentra la mayor precipitación en el año (época de lluvia), y los meses de siembra de la mayor parte de los cultivos de temporal.

En el caso de los índices de producción agropecuaria, de cultivos y cereales, se consideró la precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre con el fin de capturar el efecto de la variable precipitación en la época de siembra y crecimiento de los cultivos. Para cada una de las funciones de producción de los diferentes índices, se utilizaron distintas especificaciones. En el presente documento se reportan aquellas que presentan signos esperados y niveles de significancia aceptables.

b) Índices de producción agropecuaria

Los resultados empíricos de este ejercicio muestran la sensibilidad de la producción agropecuaria a variables climáticas. Se observan pérdidas en la producción agropecuaria como consecuencia del cambio climático.

Las ecuaciones de índices de producción agropecuaria, cultivos y cereales fueron estimadas con la precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre. Para el caso del índice de producción pecuaria, el efecto de la precipitación es indirecto, por lo cual se estimó con la desviación de su media. Los resultados se muestran en el cuadro 4. La inclusión de las variables climáticas captura el papel que tiene el clima en la determinación de la producción agropecuaria. Los signos de las variables precipitación y temperatura son los esperados en el término lineal y cuadrático. Sin embargo, el término lineal de la precipitación no es significativo en el caso de las ecuaciones de los índices de producción agropecuaria y cereales. Con respecto a la temperatura, el término lineal y el cuadrático son significativos en todos los casos.

El signo negativo en los términos cuadráticos demuestra que las funciones presentan rendimientos decrecientes en temperatura y precipitación (véanse los gráficos 1 y 2). En promedio, niveles por debajo de 27° C provocarían incrementos en la producción agropecuaria. Una vez sobrepasado ese nivel de temperatura, se observan reducciones en la misma. Asimismo, en promedio en la región, durante la temporada de lluvias los niveles de precipitación acumulada mayores a 1.500 mm tienden a producir rendimientos decrecientes en la producción.

Los resultados muestran una relación negativa de la participación de la PEA rural en la total. El signo no esperado podría reflejar una mayor productividad en el sector, acompañado por un traslado de la PEA del sector primario hacia el secundario y terciario. De igual manera, el coeficiente relacionado con la población presenta el signo positivo esperado. Este parámetro es significativo en los casos en que se incluyó la variable; sólo el caso del índice de cereales muestra un signo negativo, aunque no es significativo. La superficie de tierra arable y cultivos permanentes, así como la superficie provista de riego, registran los signos positivos esperados. El coeficiente relacionado con el PIB posee el signo positivo esperado y es significativo. Para cada una de las funciones se probaron diferentes especificaciones; sólo se reportan aquellas que tuvieron la mayor consistencia estadística, y para ello se comprobó que los residuales de las regresiones fueran estacionarios¹⁴.

Debido a que las ecuaciones se estiman usando datos en sección cruzada, los problemas de heterocedasticidad, multicolinealidad y la estabilidad de los parámetros son relevantes. En el trabajo de Segerson y Dixon (2004) se especifica que la inclusión de variables climáticas incrementa los niveles de colinealidad debido a la inserción de los términos cuadráticos. No obstante, como se argumentó antes, la inclusión de los términos cuadráticos es importante para capturar el efecto no lineal de las variables climáticas sobre la producción y poder obtener estimaciones de los niveles a los que el clima tiene efectos adversos. Como hacen notar los autores, es importante tomar en cuenta algunas implicaciones de la

¹⁴ Esto permite descartar la posibilidad de regresiones espurias.

colinealidad en las variables climáticas. Los coeficientes deben interpretarse cuidadosamente, además de considerar que el resultado de un coeficiente no significativo a los niveles estándares de significancia no debe tomarse como evidencia de que esa variable es irrelevante para el modelo.

Cuadro 4
ESTIMACIONES DEL MODELO DE MCO SOBRE LOS ÍNDICES DE PRODUCCIÓN

	Agropecuaria	Cultivos	Cereales	Pecuaria
Desviación de la precipitación				-0,004974 (2,2586) **
Precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre	0,029883 (1,3237)	0,059692 (2,0261) **	0,013575 (0,5038)	
Precipitación acumulada en los meses de mayo a octubre ²	-0,000011 (1,8383) *	-0,000019 (2,4204) **	-0,000006 (0,7757)	
Temperatura máxima	7,832705 (4,6578) ***	5,966663 (2,6230) ***	6,958191 (3,3893) ***	10,225049 (9,0532) ***
Temperatura máxima ²	-0,146338 (3,9321) ***	-0,107786 (2,0462) **	-0,142642 (3,0036) ***	-0,195 (5,8756) ***
Participación de PEA rural/ PEA total	-144,80477 (13,5057) ***	-147,64344 (9,7172) ***	-79,64499 (5,7289) ***	-179,208276 (16,0259) ***
Población	0,000007 (16,1275) ***	0,000004 (3,3609) ***	-0,000001 (0,3713)	0,000005 (7,7555) ***
Superficie de tierra arable y cultivos permanentes		0,01153739 (2,7946) ***	0,0157634 (3,2995) ***	
Superficie de riego		0,01983 -0,2689	0,087658 -1,1214	
PIB			0,002852 (4,6206) ***	0,001069 (2,8060) ***
Observaciones	315	315	315	315
R ^{2a}	0,53	0,36	0,46	0,61

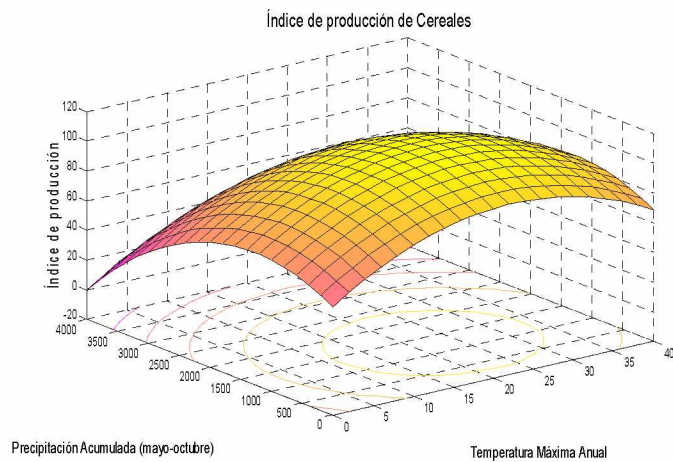
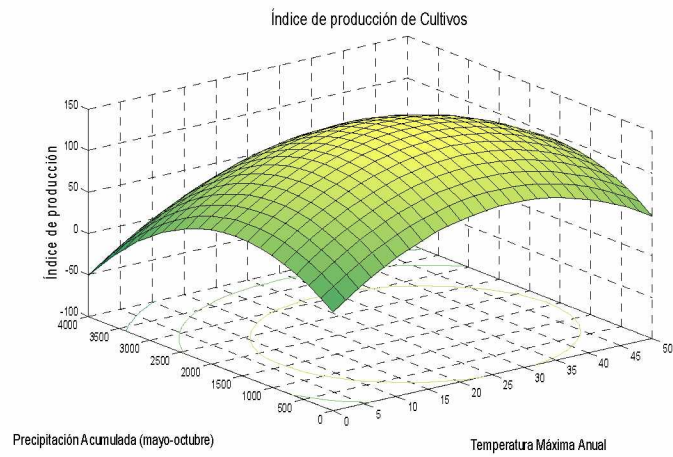
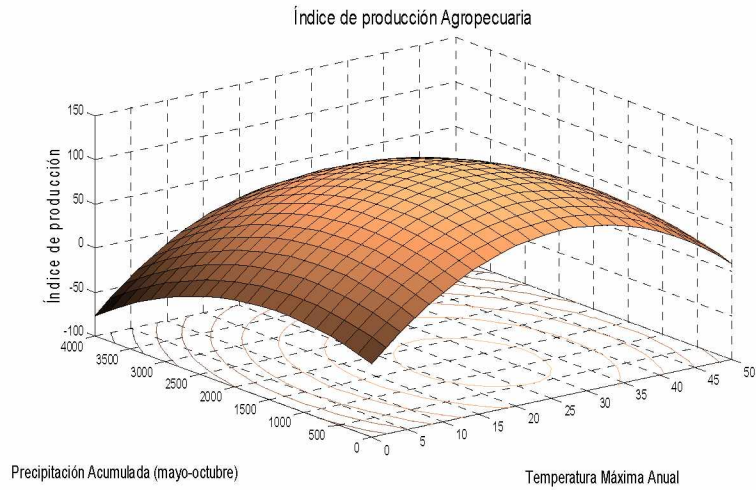
Fuente: Elaboración propia.

^a Debido a que se suprimió la constante de las ecuaciones, la R² no es relevante; sin embargo, se reporta la que proporciona el programa E-views.

Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

*** significativo al 1%; ** significativo al 5%; * significativo al 10%.

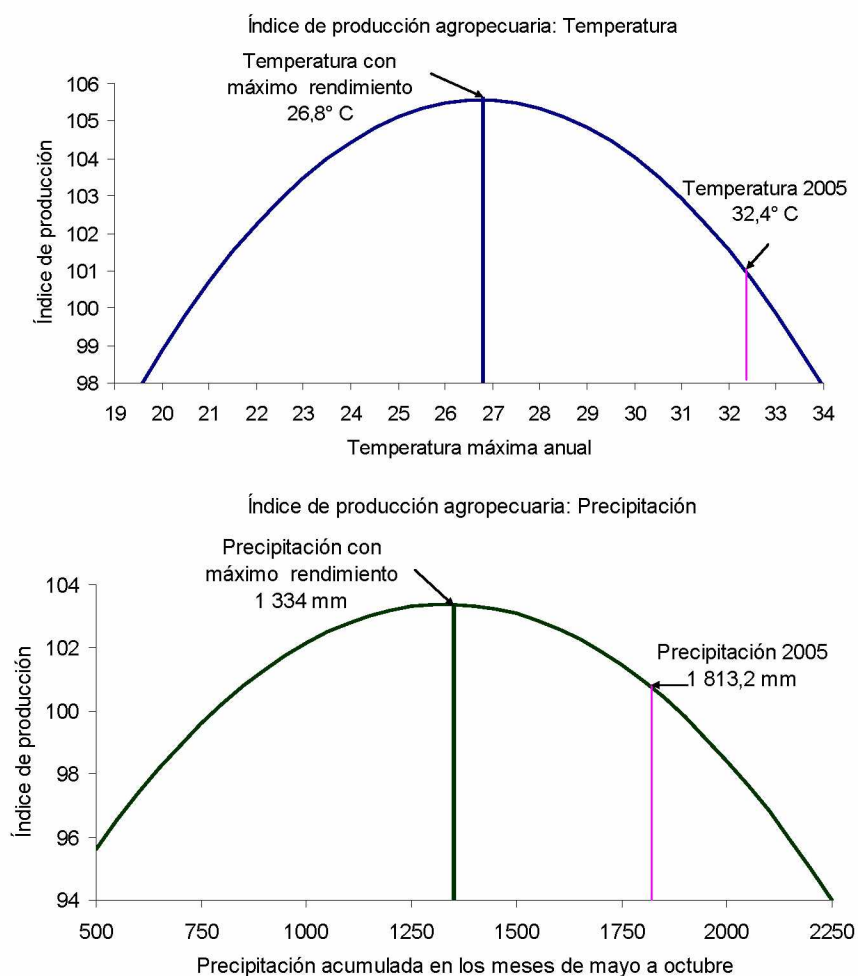
Gráfico 1
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS DE CAMBIOS EN PRECIPITACIÓN
Y TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de evaluar algunos de los efectos del cambio climático sobre la producción agropecuaria, se estimaron, con base en los coeficientes de las funciones de producción presentadas en el cuadro 4, los niveles que tendrían los índices de producción a distintos valores de temperatura y precipitación. El gráfico 2 muestra estos resultados. Las estimaciones indican que en todos los índices de producción ya se sobrepasó la temperatura que maximiza la producción. En el caso donde se incluyó precipitación, los resultados también sugieren que en 2005 ya se habría rebasado la precipitación que permite obtener la mayor producción (véase de nuevo el gráfico 2). La temperatura y la precipitación se encuentran en la parte decreciente de la función, sugiriendo que incrementos en ambas variables ocasionarán pérdidas en la producción agropecuaria. Por lo tanto, es prudente afirmar que el cambio climático tiene consecuencias negativas para la producción agropecuaria.

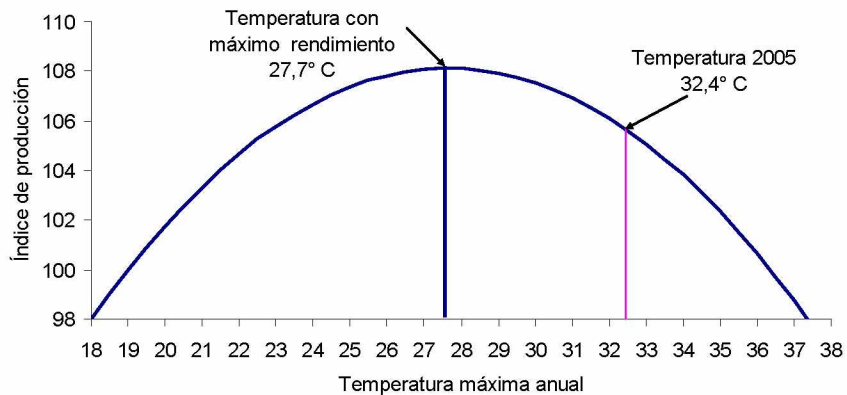
Gráfico 2
ISTMO CENTROAMERICANO: ÍNDICES DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA ANTE VARIACIONES EN LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN



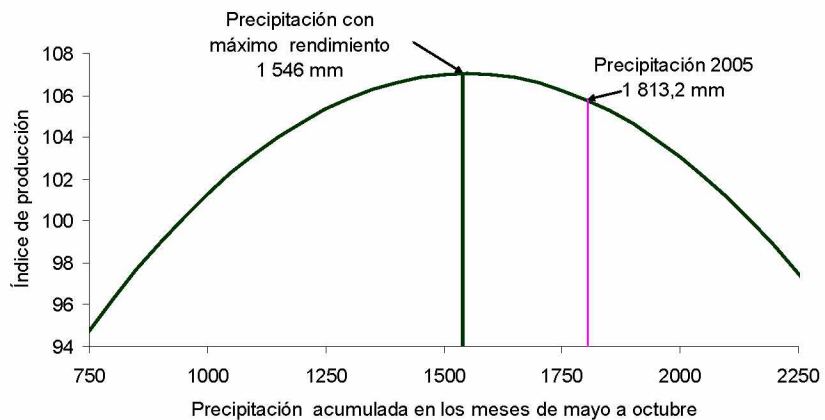
(Continúa)

Gráfico 2 (Continuación)

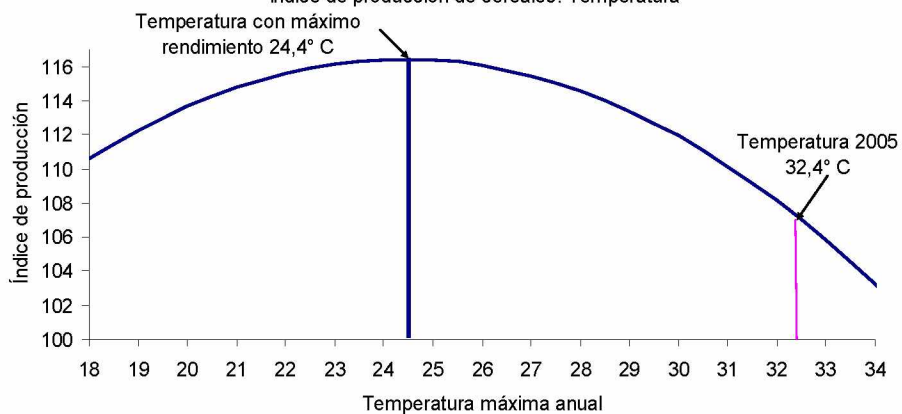
Índice de producción de cultivos: Temperatura



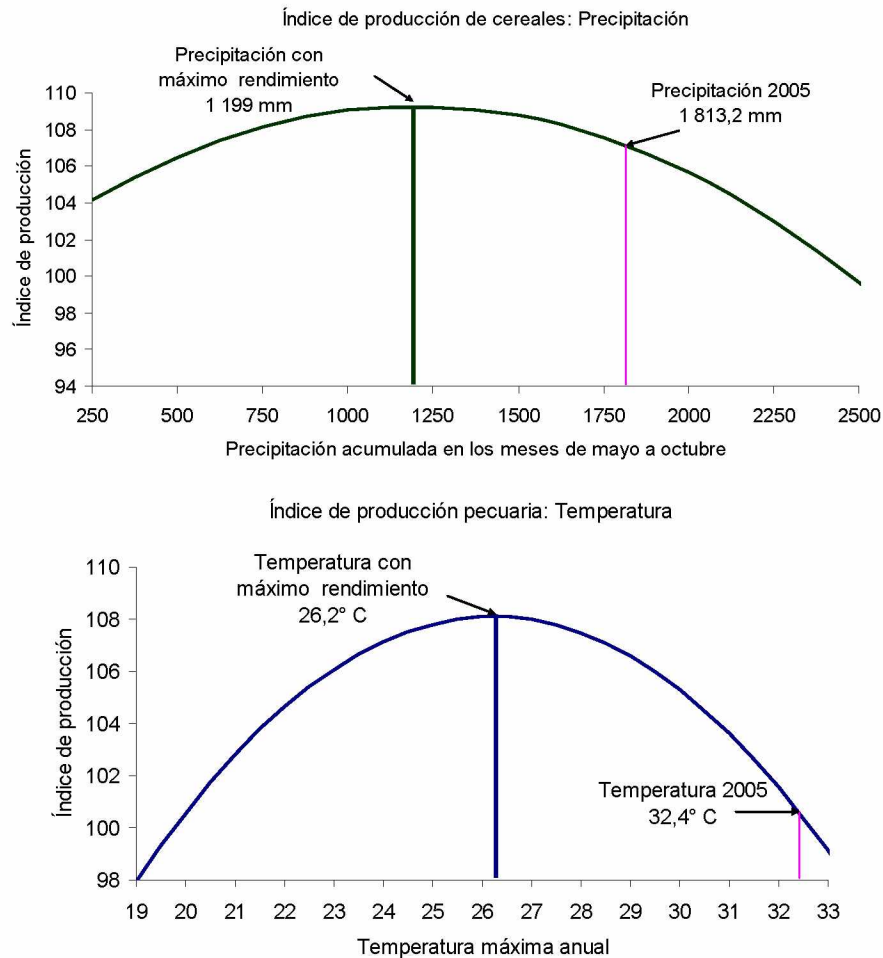
Índice de producción de cultivos: Precipitación



Índice de producción de cereales: Temperatura



(Continúa)

Gráfico 2 (Conclusión)

Fuente: Elaboración propia.

2. Impacto sobre los rendimientos de maíz, frijol y arroz

En esta sección se analizan los efectos del cambio climático sobre tres de los cultivos más importantes del Istmo Centroamericano: maíz, frijol y arroz. En el año 2007, estos países destinaron, en conjunto, 1,76 millones de hectáreas al cultivo del maíz, 732.200 hectáreas al frijol, y 227.700 al arroz. Por ello, conocer los efectos del cambio climático sobre estos tres productos puede brindar una amplia perspectiva de lo que sucederá en general con el sector agrícola de esa región.

Con ese fin, a partir de la metodología expuesta previamente, sustentada en una función de producción, se estimaron modelos de efectos fijos, para cada uno de los tres productos, en los que la variable de interés es el rendimiento, medido en toneladas producidas por hectárea. Los datos empleados comprenden el período 1961-2006¹⁵. En el cuadro 3 se presenta la estadística descriptiva.

¹⁵ Se considera hasta 2006, ya que fue el último año para el cual se tuvo información completa con respecto a todas las variables para todos los países.

Cabe mencionar que los resultados que aquí se presentan no son pronósticos de tipo puntual para cada uno de los países; sólo ofrecen una perspectiva general de lo que sucederá en la región. En futuros estudios se analizará el comportamiento de cada país por separado.

Para cada uno de los modelos se realizaron diferentes especificaciones con el propósito de obtener resultados estadísticamente robustos, pero sólo se reportan dos de las que fueron las más adecuadas para cada cultivo. Las variables explicativas que se emplearon en las especificaciones son: la población en logaritmos; la superficie provista para riego en logaritmos que se tomó como una variable *proxy* de la irrigación; la superficie de tierra arable en logaritmos; como variables climáticas se incluyeron la temperatura promedio, la temperatura media en los meses de noviembre a abril (estación del año seca) o la temperatura media en la estación del año lluviosa, que comprende los meses restantes; el cuadrado de cada uno de los tipos de temperatura promedio; la precipitación promedio, la precipitación promedio en la estación del año seca, la precipitación promedio en la estación del año lluviosa y sus respectivos cuadrados; además se incluyó una constante.

Una limitante importante en las estimaciones de los modelos que se presentan fue la falta de información de algunas variables que pudieran ser relevantes. Éste fue el caso de las características de las personas para todos los países y para todos los años del período de estudio, por lo que no fue posible incluir las posibles adaptaciones de los agricultores, problema común al que se enfrentan muchos estudios; no obstante, los resultados lucen robustos estadísticamente y consistentes en los modelos empleados. Además, las variables utilizadas así como la forma funcional coinciden con las empleadas en trabajos previos. Por ejemplo, Galindo (2009) en un estudio reciente para México utiliza como variables de control una constante, tendencia, irrigación y variables climáticas.

A continuación se presentan los resultados para cada uno de los tres cultivos.

a) El caso del maíz

El cuadro 5 presenta los resultados de las estimaciones con las dos especificaciones utilizadas para analizar los efectos sobre los rendimientos del maíz. La primera de ellas emplea la temperatura media en los meses de noviembre a abril, su cuadrado, la precipitación promedio y su cuadrado, así como la superficie provista para riego; la segunda especificación, además de las variables anteriores, incorpora a la población. Además de estas variables se emplearon otras, pero no fueron estadísticamente significativas. Los dos modelos parecen ser adecuados, tal como lo confirma el estadístico F.

Como se observa, los coeficientes muestran los signos correctos; la temperatura y la precipitación parecen observar un comportamiento ligeramente cóncavo; es decir, en niveles bajos, a medida que aumentan, tienden a estimular la producción del maíz hasta cierto punto, a partir del cual se comienza a reducir la producción. Además, los rendimientos de maíz muestran una relación positiva con la población y la irrigación. Esto se hubiera esperado *a priori*, ya que el sector agrícola de estos países es intensivo en mano de obra, generalmente no intensivo en tecnología, y con escasa cobertura de riego.

A partir de los resultados de los coeficientes estimados en el cuadro 5, se calculan los rendimientos que se obtendrían ante diferentes niveles de temperatura y precipitación, manteniendo los demás términos constantes con las cifras de 2006.

El gráfico 3 muestra los resultados para la temperatura a partir de las dos especificaciones utilizadas¹⁶. Como se observa, las estimaciones indican que —manteniendo constantes las otras variables relacionadas y la tierra cosechada— en el caso del maíz, los incrementos en temperatura podrían traer ganancias en producción en un corto plazo, y después se incurriría en pérdidas, ya que en la región es probable que aún no se alcance la temperatura promedio que permite obtener el mayor rendimiento¹⁷.

Cuadro 5
ESTIMACIÓN DEL MODELO DE EFECTOS FIJOS PARA LOS
RENDIMIENTOS POR HECTÁREA DEL MAÍZ

Variable	Especificación 1	Especificación 2
Temperatura media en los meses de noviembre a abril	2,0003 (2,52) **	1,0552 (1,35)
Temperatura media en los meses de noviembre a abril ²	-0,0382 (2,32) **	-0,0201 (1,25)
Precipitación promedio anual	0,0075 (1,89) **	0,0070 (2,03) **
Precipitación promedio anual ²	0,0000 (2,07) **	0,0000 (1,92) *
Superficie provista para riego (en logaritmos)	0,6726 (17,1) ***	0,3591 (5,26) ***
Población total (en logaritmos)		0,5166 (5,5)
Constante	-27,6443 (2,88) ***	-18,2600 (1,95)
R ²	0,658	0,6754 *
F	93,25 ***	29,9 ***
N	322	322

Fuente: Elaboración propia.

Notas: Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

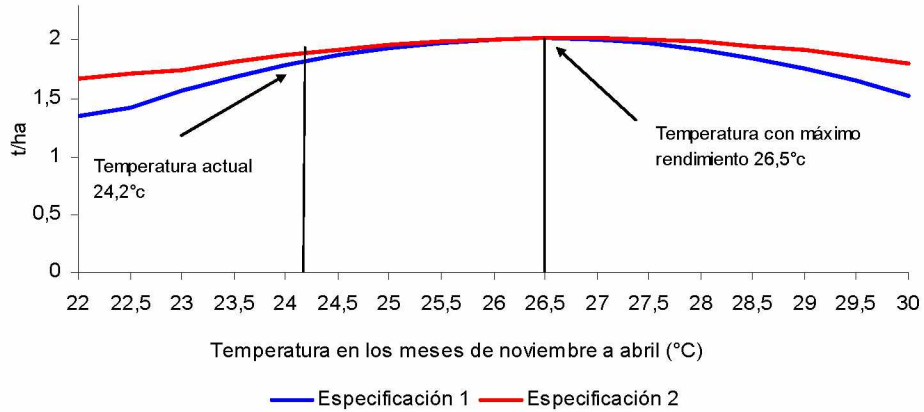
*** significativo al 1%; ** significativo al 5%; * significativo al 10%.

Por su parte, las variaciones en la precipitación, mostradas en el gráfico 4 indican que la producción de maíz tiende a decrecer una vez que se rebasan relativamente altos niveles de precipitación para los niveles actuales de la región, pero cuando los niveles de precipitación están por debajo del nivel actual, la producción del maíz se reduciría.

¹⁶ Al hacer el ejercicio con otras especificaciones se obtienen resultados similares.

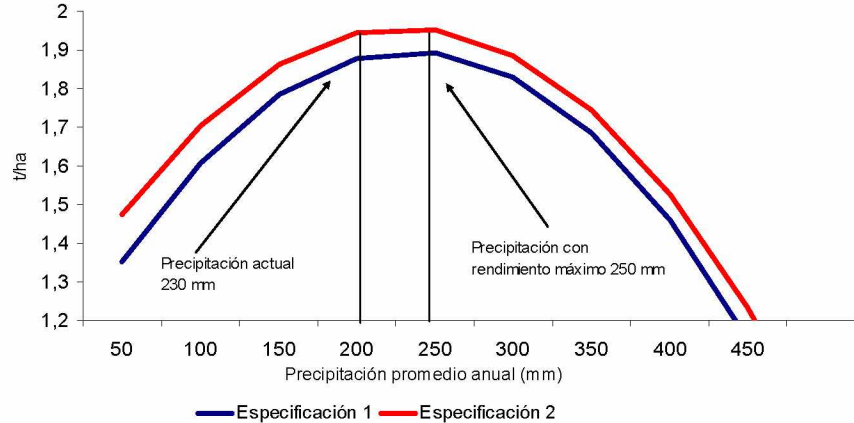
¹⁷ Los valores de temperatura y precipitación que se indican como referencia en los gráficos de esta sección son los de 2006.

Gráfico 3
ISTMO CENTROAMERICANO: RENDIMIENTOS DEL MAÍZ
ANTE VARIACIONES EN LA TEMPERATURA



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4
ISTMO CENTROAMERICANO: RENDIMIENTOS DEL MAÍZ
ANTE VARIACIONES EN LA PRECIPITACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

b) El caso del frijol

El modelo empleado para estimar los efectos sobre los rendimientos de frijol tuvo en la primera especificación, como variables independientes, la temperatura media y su cuadrado, la precipitación promedio y su cuadrado, así como la superficie provista para riego, y la población; y en la segunda especificación se incorporó, además de las variables anteriores, a la superficie de tierra arable, variable que sólo resultó estadísticamente significativa en la estimación de los rendimientos del frijol. De acuerdo con el estadístico F, ambos modelos parecen ser adecuados.

En el cuadro 6 se presentan los resultados de esta estimación. El frijol es de los tres productos que aquí se analizan el que presenta los menores rendimientos, los cuales han permanecido sin mayor variación en cifras muy similares a lo largo del tiempo; por ejemplo, en 1961 el rendimiento por hectárea de este producto para la región en su conjunto era de 0,6 toneladas en 1961, y en 2006 el rendimiento fue de 0,9 toneladas. Esto puede explicar que en algunos casos la significancia estadística de los coeficientes sea relativamente baja; no obstante, todos muestran los signos adecuados.

Cuadro 6
ESTIMACIÓN DEL MODELO DE EFECTOS FIJOS PARA LOS
RENDIMIENTOS POR HECTÁREA DEL FRIJOL

Variable	Especificación 1	Especificación 2
Temperatura promedio anual	1,7397 (2,65) **	1,5540 (2,37) **
Temperatura promedio anual ²	-0,0349 (2,63) **	-0,0311 (2,34) **
Precipitación promedio anual	0,0025 (1,29)	0,0020 (1,02)
Precipitación promedio anual ²	-0,00001 (1,24)	0,0000 (0,95)
Superficie provista para riego (en logaritmos)	0,0174 (0,44)	0,0283 (0,71)
Población total (en logaritmos)	0,1330 (2,34) **	0,0832 (1,38)
Superficie de tierra arable (en logaritmos)		0,1417 (2,34) **
C	-22,4 (2,78) ***	-20,61313 (2,56) ***
R ²	0,1548	0,1695
F	9,43 **	8,5 **
N	322	322

Fuente: Elaboración propia.

Notas: Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

*** significativo al 1%; ** significativo al 5%; * significativo al 10%.

Al igual que en el caso del maíz, la temperatura parece mostrar un comportamiento cóncavo, al igual que la precipitación, variable que no resultó estadísticamente significativa en estas dos especificaciones¹⁸. La población y el riego observan una relación positiva con los rendimientos, aunque esta última variable no es estadísticamente significativa. La superficie de tierra arable también indica una relación positiva con los rendimientos de frijol.

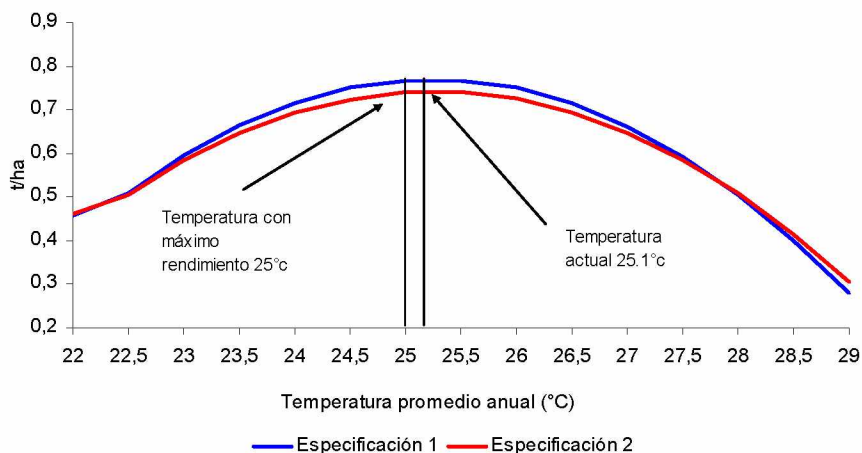
En los gráficos 5 y 6 se muestran los resultados de las estimaciones en los rendimientos ante cambios en la temperatura y la precipitación, respectivamente. En el primero de estos gráficos se observa

¹⁸ La no significancia estadística de esta variable puede deberse a un problema de colinealidad; no obstante, como se argumentó antes, es obvio que no debe tomarse como evidencia de que esa variable sea irrelevante para el modelo, pues en algunas especificaciones sí se encontró relevancia estadística.

que para el frijol ya se habría rebasado la temperatura que permite el mayor rendimiento, y en consecuencia es probable que el calentamiento global ya esté teniendo efectos negativos sobre este producto.

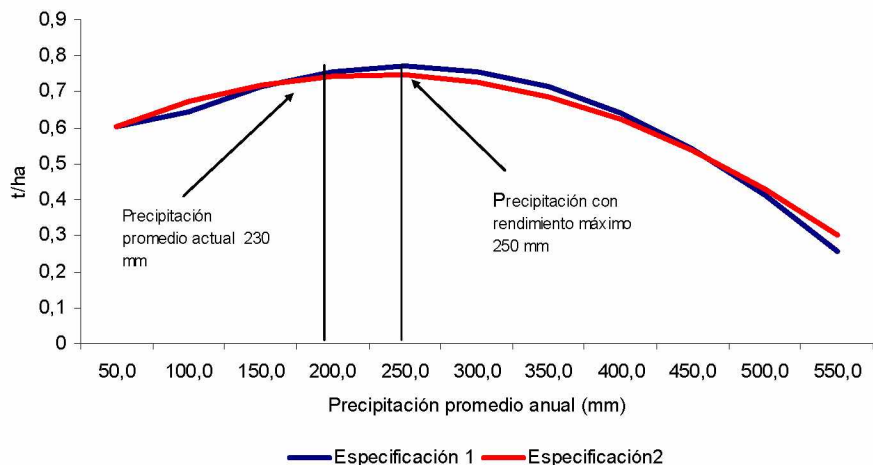
Por su parte, en el gráfico 6 se indica que los rendimientos de frijol tienden a decrecer cuando la precipitación es menor al nivel actual, pero pueden incrementar ante aumentos ligeros en la precipitación. No obstante, altos niveles de precipitación podrían generar que los rendimientos se reduzcan; éste puede ser el caso en que se presentan inundaciones.

Gráfico 5
ISTMO CENTROAMERICANO: RENDIMIENTOS DEL FRIJOL ANTE VARIACIONES EN LA TEMPERATURA



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6
ISTMO CENTROAMERICANO: RENDIMIENTOS DEL FRIJOL ANTE VARIACIONES EN LA PRECIPITACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

c) **El caso del arroz**

Para conocer los posibles efectos sobre los rendimientos de arroz, el modelo incluyó en la primera especificación, como variables independientes, la temperatura media y su cuadrado, la precipitación promedio en los meses de mayo a octubre y su cuadrado, así como la superficie provista para riego; la segunda especificación comprende, además de las variables anteriores, a la población.

Los resultados de las dos especificaciones se presentan en el cuadro 7. Al igual que en el caso de los cultivos anteriores, la temperatura y la precipitación parecen mostrar un comportamiento cóncavo, y el riego y la población una relación directa con el rendimiento de arroz. También el estadístico F muestra que las dos especificaciones son adecuadas.

Cuadro 7
ESTIMACIÓN DEL MODELO DE EFECTOS FIJOS PARA
LOS RENDIMIENTOS POR HECTÁREA DEL ARROZ

Variable	Especificación 1	Especificación 2
Temperatura promedio anual	8,952844 (2,94) ***	5,251 (1,7) *
Temperatura promedio anual ²	-0,1722739 (2,79) ***	-0,103 (1,64) *
Precipitación promedio en los meses de mayo a octubre	0,0119453 (2,13) **	0,011 (2,1) **
Precipitación promedio en los meses de mayo a octubre ²	-0,0000171 (1,92) *	0,000 (1,92) **
Superficie provista para riego (en logaritmos)	1,153162 (10,3) ***	0,398 (2,12) **
Población total (en logaritmos)		1,234 (2,62) **
Constante	-119,2148 (3,16) ***	-77,288 (2,06) **
R ²	0,4546	0,4979
F	53,66 ***	43,63 ***
N	322	322

Fuente: Elaboración propia.

Notas: Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

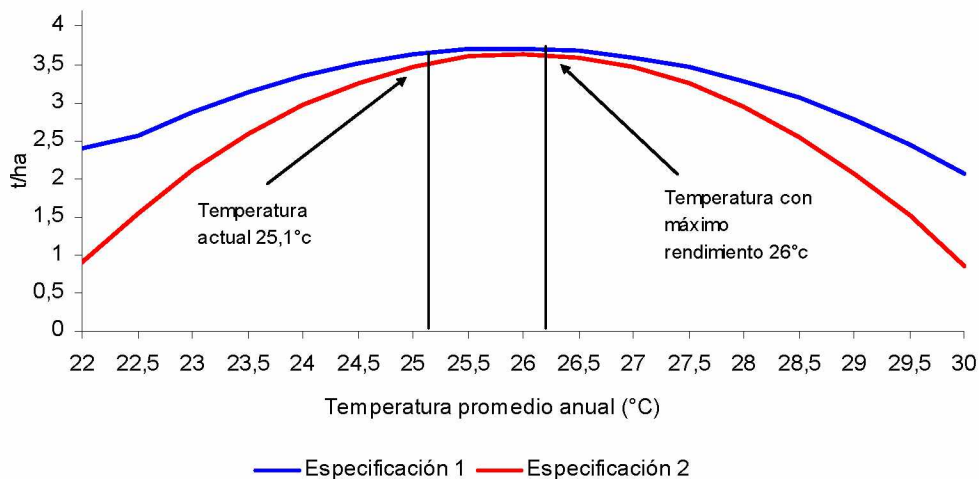
*** significativo al 1%; ** significativo al 5%; * significativo al 10%.

El ejercicio mostrado en la gráfico 7 indica que estaría por alcanzarse el nivel de temperatura que permite el máximo rendimiento de producción de arroz¹⁹. En tanto que en el gráfico 8 se aprecia que los rendimientos de arroz tienden a decrecer cuando la precipitación supera el nivel promedio actual de la

¹⁹ Con otras especificaciones se encontró que actualmente se estaría en el nivel que permite el mayor rendimiento.

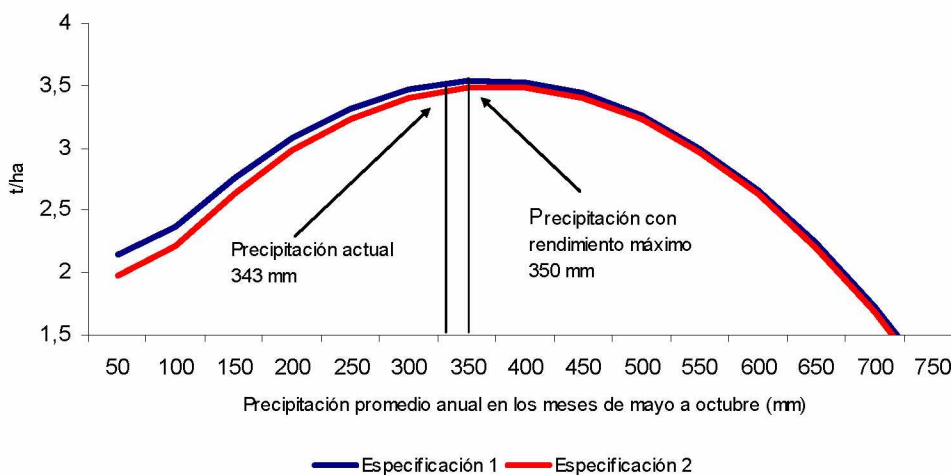
región (mayor a 350 mm) en los meses de mayo a octubre, que es la precipitación que apareció como relevante en las estimaciones de los rendimientos de este cultivo.

Gráfico 7
ISTMO CENTROAMERICANO: RENDIMIENTOS DEL ARROZ ANTE VARIACIONES EN LA TEMPERATURA



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8
ISTMO CENTROAMERICANO: RENDIMIENTOS DEL ARROZ ANTE VARIACIONES EN LA PRECIPITACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

3. Impacto sobre el valor de la tierra (ganancias agrícolas). Datos y resultados del enfoque Ricardiano: El caso de Honduras

a) Datos

Los datos económicos y sociodemográficos fueron obtenidos de la Encuesta Permanente de Hogares de Propósitos Múltiples realizada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) de Honduras en septiembre de 2006. La información de esta encuesta es de cobertura nacional y tiene como unidad de análisis los hogares de este país. La documentación de la encuesta y la base de datos han sido preparadas por la División de Estadística y Proyecciones Económicas de la CEPAL, quien además tuvo a su cargo evaluar la consistencia de la información y generar un conjunto de nuevas variables en un contexto de comparabilidad con los demás países de América Latina. Los datos meteorológicos fueron proporcionados por el Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estos datos comprenden información de temperatura y precipitación a nivel municipal. Por último, los datos de las características de suelos se obtuvieron a partir de información de FAO (2003).

b) Resultados

En el cuadro 8 se muestran las estadísticas descriptivas empleadas en el modelo Ricardiano. El conjunto de variables se presentan en tres grupos: sociodemográficas, agrícolas y climáticas. Asimismo, en el cuadro se observan la media y la desviación estándar de las variables clave utilizadas en la modelación para la muestra completa y para los hogares que se encuentran en los primeros ocho y los últimos dos deciles de las ganancias agrícolas. Resulta importante señalar que la variable que se usa como proxy de la renta de la tierra la constituyen las ganancias agrícolas reportadas por los hogares que participan en esta actividad.

Las variables climáticas sólo se presentan para el total de la muestra empleada, y las variables sociodemográficas para la muestra completa y para los dos grupos de hogares señalados anteriormente. El tamaño promedio de los hogares en el total de la muestra es de 5,5 miembros, y es mayor para los hogares de los últimos dos deciles con 5,9 miembros. La escolaridad promedio del jefe del hogar es de 2,4 años, y la escolaridad media del hogar, sin incluir al jefe, es de dos años; ambas variables son superiores en los últimos dos deciles de las ganancias agrícolas, con 2,8 y 2,4 años de instrucción, respectivamente.

La edad promedio de los jefes de hogar es de 48,4 años para la muestra total, siendo 48,1 años para los primeros ocho deciles y 49,4 años para los últimos dos con respecto al número de jefes del hogar que saben leer y escribir, se observa un número mayor para los jefes en los últimos dos deciles. El número promedio de cuartos en el hogar registrado en la muestra es de 3,2, y es mayor para los hogares de los últimos dos deciles con 3,7, lo que representa 23,3% más cuartos para esas familias con relación a los primeros ocho deciles que tienen una media de tres cuartos.

Cuadro 8
ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS

Concepto	Total de hogares en la muestra		Hogares en los primeros ocho deciles de las ganancias agrícolas		Hogares en los últimos dos deciles de las ganancias agrícolas	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Sociodemográficas						
Tamaño del hogar	5,5	2,4	5,5	2,4	5,9	2,5
Educación promedio del hogar sin jefe (años)	2,0	1,5	1,9	1,5	2,4	1,7
Educación del jefe del hogar (años)	2,4	2,4	2,3	2,4	2,8	2,5
Número de cuartos	3,2	3,4	3,0	3,3	3,7	3,7
Edad del jefe del hogar	48,4	15,3	48,1	15,6	49,4	14,0
Sabe leer y escribir el jefe de hogar	0,6	0,5	0,6	0,5	0,7	0,5
Número de personas mayores de 15 años en el hogar	3,1	1,4	3,0	1,4	3,4	1,5
Género del jefe del hogar (<i>Dummy</i> : 1 = masculino)	0,9	0,3	0,9	0,3	0,9	0,3
Variables agrícolas						
Ingreso agropecuario mensual por hogar (dólares)	72,85	796,11	45,91	879,03	185,28	196,84
Ingreso agrícola mensual por hogar (dólares)	44,72	98,30	14,96	11,35	168,93	174,22
Ingreso ganadero mensual por hogar (dólares)	28,13	790,74	30,94	879,19	16,36	94,78
Ganancias agrícolas mensuales por hogar (dólares)	46,49	97,90	17,15	12,66	168,93	174,23
Variables climáticas						
Temperatura mínima promedio anual (Celsius)	21,3	2,9	...	...	...	...
Temperatura máxima promedio anual (Celsius)	25,4	2,6	...	...	...	...
Temperatura promedio anual (Celsius)	23,5	2,6	...	...	...	...
Temperatura promedio en estación lluviosa (Celsius)	23,9	2,5	...	...	...	...
Temperatura promedio en estación seca (Celsius)	22,9	2,8	...	...	...	...
Temperatura máxima promedio en estación lluviosa (Celsius)	25,3	2,4	...	...	...	...
Temperatura máxima promedio en estación seca (Celsius)	25,1	2,5	...	...	...	...
Temperatura mínima promedio en estación lluviosa (Celsius)	22,2	2,6	...	...	...	...
Temperatura mínima promedio en estación seca (Celsius)	21,4	3,0	...	...	...	...
Precipitación promedio anual (mm/mo)	125,8	25,7	...	...	...	...
Precipitación acumulada anual (mm/mo)	1 509,5	308,1	...	...	...	...
Precipitación promedio en estación lluviosa (mm/mo)	187,0	40,1	...	...	...	...
Precipitación promedio en estación seca (mm/mo)	40,0	28,7	...	...	...	...
Tamaño de la muestra		3 947		3 177		770

Fuente: Elaboración propia con base en la Encuesta Permanente de Hogares de Propósitos Múltiples. Honduras, septiembre de 2006.

El ingreso agrícola mensual promedio es de 44,72 dólares para la muestra total, en la que los hogares situados en los primeros ocho deciles tienen una media de 14,96 dólares, 66,5% por debajo de la media muestral, y los hogares situados en los últimos dos deciles una media de 168,93 dólares, muy por arriba de la media muestral. El ingreso agropecuario promedio mensual es de 72,85 dólares para la muestra total, mientras que para los hogares situados en los primeros ocho deciles es de 45,91 dólares, y los hogares situados en los últimos dos deciles reciben en promedio un ingreso superior a los 185 dólares mensuales²⁰.

Asimismo, en el cuadro 8 se observan algunas variables climáticas empleadas en las distintas estimaciones econométricas de este estudio, entre las que destacan la precipitación acumulada anual y la temperatura promedio anual, entre otras.

En el cuadro 9 se incluyen los resultados de tres estimaciones realizadas, utilizando la muestra completa de los hogares que reportaron actividad agrícola y tomando como variable dependiente las ganancias agrícolas. Además de las variables sociodemográficas, en la primera columna, el modelo I considera dos variables climáticas: temperatura media anual y precipitación acumulada anual. En el modelo II se introducen variables *dummy* de características de suelos a nivel municipal, y en el modelo III se incorporan términos cuadráticos para la temperatura anual y la precipitación acumulada, así como una variable de interacción entre la precipitación y la temperatura.

Los efectos de la temperatura media y la precipitación acumulada son significativos, así como el impacto del número de personas mayores de 15 años y la escolaridad del jefe de hogar. Por ejemplo, para el modelo I las ganancias agrícolas mensuales promedio disminuyen en 1,72 dólares ante un incremento de un grado Celsius en la temperatura media anual. Dicho efecto representa poco más del 1% del ingreso promedio de los hogares rurales hondureños. Sin embargo, si se considera el 20% de los hogares rurales con menos ingresos, el efecto representa una disminución del 23% en su ingreso. Asimismo las ganancias agrícolas aumentan 4,2 dólares si la escolaridad del jefe del hogar es mayor en un año (equivalente al 2,8% del ingreso promedio de los hogares rurales). Existen diferencias atribuibles al género del jefe de familia y por el tipo de vivienda que poseen, pues la variable *dummy*, definida para distinguir el material del techo de la vivienda, es significativa. De esta manera, aquellos hogares encabezados por jefes de género masculino perciben en promedio más de 17 dólares por concepto de ganancias agrícolas (equivalente a 11% del ingreso promedio total de los hogares rurales). Para los modelos II y III, las variables *dummy* de suelo que fueron significativas corresponden a los tipos de suelo: luvisols y rendzinas, con un efecto positivo al 95% de nivel de confianza. Resulta importante señalar que el signo y la significancia de los coeficientes para las variables de control antes señaladas se mantiene a través de los tres modelos utilizados, lo que proporciona evidencia de que los resultados presentados son bastante robustos.

En el cuadro 10 se presentan los efectos marginales de las variables climáticas sobre las ganancias agrícolas de los hogares hondureños. Los efectos anuales de la precipitación acumulada y la temperatura media se calcularon para la muestra total, y puede observarse que la inferencia es robusta para las tres especificaciones empleadas a un nivel de confianza del 95%, ya que en los tres modelos empleados se mantiene tanto el signo como la significancia.

²⁰ Las cifras presentadas en dólares corresponden a dólares de diciembre de 2003.

Cuadro 9
ESPECIFICACIONES LINEALES DEL MODELO RICARDIANO: EL CASO DE HONDURAS

Variablen	Modelo I	Modelo II	Modelo III
Temperatura media anual	-1,72 (2,80) ***	-2,14 (2,96) ***	13,25 (1,11)
Temperatura media anual al cuadrado			-0,37 (1,57)
Precipitación acumulada anual	-0,02 (3,98) ***	-0,013 (2,59) **	-0,065 (0,91)
Precipitación acumulada anual al cuadrado			0,00078 (0,59)
Temperatura media anual *precipitación acumulada anual			0,001226 (0,5)
Miembros de mayores de 15 años en el hogar	5,33 (4,64) ***	5,68 (4,97) ***	5,67 (4,96) ***
Género del jefe de hogar	17,27 (3,65) ***	16,82 (3,57) ***	16,42 (3,48) ***
Edad del jefe de hogar	0,15 (1,31)	0,14 (1,25)	0,15 (1,31)
Escolaridad del jefe de hogar (años)	4,2 (6,37) ***	4,25 (6,46) ***	4,28 (6,5) ***
Techo de loza (<i>dummy</i>)	57,67 (2,23) **	59,14 (2,29) **	58,43 (2,27) **
Alumbrado público (<i>dummy</i>)	6,43 (1,80) *	6,95 (1,91) *	6,71 (1,84)* *
Acrisols		10,34 (1,15)	5,09 (0,54)
Cambisols		11,12 (1,46)	6,69 (0,84)
Rendzinas		33,43 (3,91) ***	27,17 (2,93) ***
Gleysols		16,4 (0,62)	4,23 (0,15)
Fluvisols		11,89 (0,88)	7,91 (0,57)
Luvisols		34,04 (4,11) ***	27,79 (3,08) ***
Histosols		5,92 (0,45)	6,89 (0,52)
Regosols		-9,43 (0,42)	-10,22 (0,45)
Constante	65,94 (3,94)	48,29 (2,64) **	-83,25 (0,49)
Estadístico F	13,99 ***	10,48 ***	9,02 ***

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

*** significativo al 1%; ** significativo al 5%; * significativo al 10%.

El número de la muestra es de 3,947 hogares.

El incremento en un grado Celsius de la temperatura media implica una disminución de 1,72, 2,14 y 2,56 dólares bajo el modelo I, II y III, respectivamente. Es decir, existe un impacto negativo de entre 1,72 y 2,5 dólares en las ganancias agrícolas mensuales ante un ligero aumento en la temperatura media anual. Considerando el promedio de los efectos marginales (2,14) ante un ascenso de dos grados Celsius en la temperatura media anual, las ganancias agrícolas mensuales promedio aproximadamente se reducirían en 9%, lo que representa para los hogares rurales hondureños cerca del 3% de su ingreso mensual total. Este impacto es mucho mayor para los primeros dos deciles de los hogares rurales (57% de su ingreso), pero es considerablemente menor para el 20% de los hogares rurales con mayores ingresos (sólo 1,3% de su ingreso total).

De forma similar, un incremento en una unidad de la precipitación acumulada anual implica una contracción aproximada de 0,02 dólares bajo el modelo I; 0,013 dólares bajo el modelo II y 0,012 dólares bajo el modelo III. Es decir, existe un impacto negativo relativamente pequeño en las ganancias agrícolas mensuales ante un ligero aumento en la precipitación acumulada anual. Los resultados anteriores indican que las ganancias agrícolas promedio mensuales se reducirían menos de 20 centavos de dólar ante un crecimiento de 10 mm en la precipitación acumulada anual, lo que representa una disminución del 0,1% del ingreso mensual total en los hogares rurales de Honduras. Sin embargo, para 20% de los hogares rurales con menos ingresos, este efecto representa cerca del 3% de su ingreso total.

Cuadro 10
EFFECTOS MARGINALES DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS SOBRE LAS
GANANCIAS AGRÍCOLAS
(Modelo lineal)

	Modelo I	Modelo II	Modelo III
Temperatura promedio anual	-1,72 (2,8) ***	-2,14 (2,96) ***	-2,56 (3,23) ***
Precipitación acumulada anual	-0,02 (3,98) ***	-0,013 (2,59) **	-0,012 (2,08) **

Fuente: Elaboración propia.

Nota 1: Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

*** significativo al 1%; ** significativo al 5%; * significativo al 10%.

Nota 2: Los efectos marginales para los términos cuadráticos se calculan tomando en cuenta el valor medio de las variables y los coeficientes reportados en el cuadro 9.

Aun cuando resulta intuitivo pensar que una temperatura más elevada afecta negativamente a la actividad agrícola, los efectos negativos atribuibles a un aumento en la precipitación acumulada anual no son evidentes, lo cual invita a explorar dicha relación con mayor cuidado. No obstante, es posible percibir que el efecto negativo debe ser dominado por la presencia de fenómenos meteorológicos adversos, tales como inundaciones y huracanes, entre otros.

V. LOS ESCENARIOS FUTUROS: LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL SECTOR AGROPECUARIO

1. Impactos sobre la producción agropecuaria

Para cuantificar los impactos económicos en el sector agropecuario, ocasionados por las variaciones en la precipitación y la temperatura como consecuencia del cambio climático, se requirieron de los escenarios climáticos proporcionados por el Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Con el fin de calcular estos impactos, se mantuvieron constantes, con valores de 2005, las variables de control utilizadas en las funciones de producción y sólo se permitieron variaciones en temperatura y precipitación. De igual modo, se supuso la inexistencia de cambios tecnológicos y una adaptación nula a los efectos del cambio climático por parte de los agricultores.

Las estadísticas descriptivas y los gráficos de los escenarios A2 (con base en el promedio de los modelos HADGEM, GFDL y ECHAM²¹) y B2 (con base en el promedio de los modelos HADGEM, GFDL y ECHAM) muestran que tanto el escenario B2 como el A2 pronostican una disminución en la precipitación acumulada anual en la región. Sin embargo, el escenario A2 indica niveles menores de precipitación en el período 2005-2100. Además de pronosticar niveles de precipitación menores que los del escenario B2, la variación en la precipitación es mayor en el escenario A2, como lo demuestra la desviación estándar. En el caso de la temperatura, el escenario A2 pronostica incrementos mayores a los pronosticados por el escenario B2 (véase el anexo III).

Los impactos económicos del cambio climático en el sector agropecuario, considerando diferentes tasas de descuento y distintos horizontes temporales para los escenarios A2 y B2.

Para el presente análisis sólo se considerarán los escenarios A2 y B2; el resultado de las estimaciones de los escenarios A2 se presentan en el cuadro 11, las del B2 se incluyen en el anexo IV. Las simulaciones con este escenario indican que los impactos negativos derivados de las variaciones en temperatura y precipitación en el sector agropecuario del Istmo Centroamericano, con una tasa de descuento del 4%, alcanzan 2,8% del PIB²² para el 2050 y 4% para el 2100. Sin embargo, al considerar una tasa de descuento de 0,5%, estos mismos impactos representan 5,4% del PIB en 2050 y 19,1% en 2100.

Los resultados considerando los impactos por cambios en temperatura y precipitación por separado, para el promedio de escenarios A2, se presentan en la parte inferior del cuadro 11. Los impactos de cambios en la temperatura en el sector agropecuario, con una tasa de descuento de 4%, son de 1,8% del PIB, calculados a 2050, y de 3,4%, calculados a 2100. Por otro lado, si sólo se toman en cuenta los cambios en la precipitación, los impactos ascienden a 0,97% en 2050 y a 0,59% en 2100.

En el cuadro 11 también se muestran los impactos negativos del cambio climático en el sector agrícola (índice de cultivos). Para el promedio de escenarios A2, los impactos ocasionados por variaciones en temperatura y precipitación, con una tasa de descuento del 4%, son de 2% del PIB para el 2050 y 2,6% para el 2100. De la misma forma se realizaron las estimaciones para calcular los impactos sobre la producción de cereales, cuyos resultados se presentan en la parte derecha del cuadro 11. Para el

²¹ ECHM German High Performance Computing Centre Climate and Earth System Research; GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; HADGEM Hadley Centre Global Environmental Model.

²² Para el presente análisis se consideran todos los impactos como porcentajes del PIB de 2007 del Istmo Centroamericano.

promedio de escenarios A2 los impactos ocasionados por variaciones en temperatura y precipitación, con una tasa de descuento del 4%, son de 0,3% del PIB para el 2050 y de 0,47% para el 2100. Como se observa en el cuadro 11, la proporción mayor de impactos negativos en el sector serán consecuencia de incrementos en la temperatura.

Cuadro 11
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO:
2020, 2030, 2050, 2070 Y 2100
ESCENARIO A2 (ECHAM, GFDL, HADGEM)
(En porcentajes del PIB de 2007)

Año	Producción agropecuaria				Producción agrícola				Producción de cereales			
	Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)			
	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08
Cambios en temperatura y precipitación												
2020	1,75	1,58	1,38	1,08	1,25	1,14	1,00	0,80	0,17	0,15	0,13	0,10
2030	3,42	2,81	2,21	1,47	2,50	2,05	1,62	1,09	0,32	0,26	0,21	0,14
2050	5,41	3,99	2,82	1,64	3,77	2,81	2,01	1,20	0,62	0,44	0,30	0,16
2070	8,67	5,44	3,32	1,71	5,30	3,49	2,24	1,23	1,14	0,67	0,38	0,17
2100	19,10	8,61	4,01	1,75	11,49	5,37	2,65	1,25	2,53	1,10	0,47	0,18
Cambios en temperatura												
2020	0,88	0,77	0,66	0,48	0,34	0,30	0,25	0,19	0,12	0,11	0,09	0,07
2030	1,61	1,31	1,02	0,65	0,62	0,51	0,40	0,25	0,22	0,18	0,14	0,09
2050	4,40	2,96	1,85	0,88	1,72	1,15	0,72	0,34	0,61	0,41	0,26	0,12
2070	9,28	5,12	2,60	0,98	3,66	2,01	1,02	0,38	1,26	0,70	0,36	0,14
2100	21,73	8,91	3,42	1,03	8,69	3,54	1,35	0,40	2,89	1,20	0,46	0,14
Cambios en precipitación												
2020	0,87	0,80	0,73	0,60	0,91	0,83	0,75	0,61	0,05	0,04	0,04	0,03
2030	1,82	1,50	1,19	0,81	1,87	1,54	1,22	0,83	0,10	0,08	0,06	0,04
2050	1,01	1,04	0,97	0,76	2,05	1,65	1,28	0,85	0,02	0,03	0,04	0,04
2070	-0,61	0,32	0,72	0,72	1,65	1,47	1,22	0,84	-0,12	-0,03	0,02	0,04
2100	-2,63	-0,29	0,59	0,72	2,80	1,83	1,30	0,85	-0,36	-0,10	0,00	0,03

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la producción pecuaria y debido a la especificación utilizada, sólo fue posible calcular los impactos por cambios en temperatura (véase el anexo IV). Tomando como referencia el promedio de escenarios A2 y una tasa de descuento de 4%, los impactos ascienden a 1% del PIB calculados al año 2050 y 1,8% calculados al 2100.

Como ya se mencionó, la temperatura y la precipitación promedio de 2005 provocaron que la producción en la parte decreciente de la función, apuntando a que el cambio climático producirá pérdidas en la producción agropecuaria. En el gráfico 9 se indica la proyección del índice de producción agropecuaria de acuerdo con el promedio de escenarios A2; se puede observar las consecuencias negativas del cambio climático en la producción agropecuaria.

Por su parte, las proyecciones con base en el escenario B2 promedio señalan que los impactos derivados de variaciones en temperatura y precipitación en el sector agropecuario, con una tasa de descuento del 4%, alcanzan 2% del PIB para el 2050 y 3% para el 2100 (véase el anexo IV y el gráfico 10). La caída en la producción es menor en este escenario que, si se compara con la registrada en la producción, que pronostica el promedio de escenarios A2, las diferencias se pueden ver claramente al comparar los gráficos 9 y 10.

En el sector agrícola (índice de cultivos) el promedio de escenarios B2 pronostica que los impactos ocasionados por variaciones en temperatura y precipitación, con una tasa de descuento del 4%, son de 1,4% del PIB para el 2050 y 1,8% para el 2100. No obstante, al considerar una tasa de descuento de 0,5%, estos mismos impactos representan 3,07% del PIB en 2050 y 7,54% en 2100.

2. Impactos sobre los rendimientos de maíz, frijol y arroz

A partir de los resultados de los coeficientes estimados en la sección 2 del capítulo IV (véanse los cuadros 5, 6 y 7). Para cada una de las variables dependientes, se realizaron estimaciones de cómo podría evolucionar el rendimiento de los cultivos entre 2006 y 2100. Para ello se utilizaron dos escenarios de estimación del clima: A2 y B2.

En el gráfico 11 se presentan los resultados de las estimaciones para los rendimientos de maíz a partir de los 2 escenarios y para las dos especificaciones empleadas. Las proyecciones se hacen con variaciones en la temperatura y la precipitación, manteniendo los demás términos constantes con valores de 2006. Como se observa, en los dos escenarios, las estimaciones muestran comportamientos similares; la producción tiende a crecer ligeramente en el corto plazo y luego a decrecer. Así, el cambio climático podría favorecer inicialmente la producción del maíz y posteriormente generaría pérdidas.

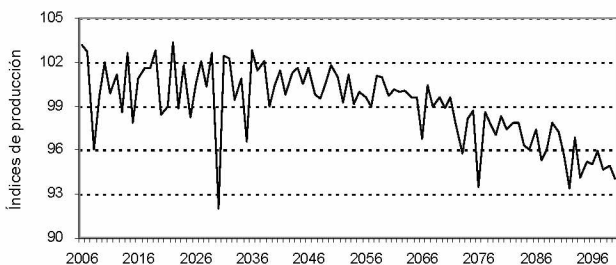
Con los valores estimados previamente, en 2007 se calcularon los posibles impactos en términos del PIB de la región. En el cuadro 12 se presentan estos resultados, en el que se emplean las siguientes tasas de descuento: 0,5%, 2%, 4% y 8%. Como se observa, en el caso del maíz los beneficios iniciales que podría ocasionar el cambio climático se nulificarían en el largo plazo.

En el gráfico 12 se muestra la evolución del rendimiento en frijol a partir de las estimaciones anteriores y de los escenarios A2 y B2. Como se observa, los dos escenarios sugieren que el cambio climático traería como consecuencias disminuciones importantes en los rendimientos de este producto, ya que como se mostró anteriormente, la temperatura que permite el máximo rendimiento para este producto ya se habría rebasado.

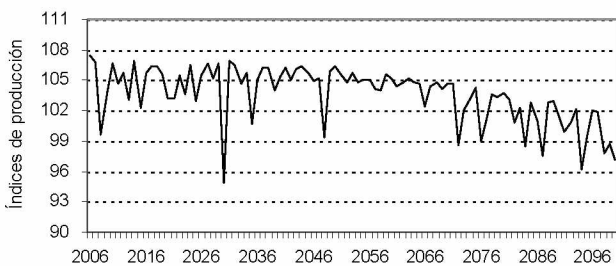
Para conocer cómo se traducirían estas disminuciones en términos económicos también se calcularon los posibles impactos, tomando como referencia el PIB de la región en 2007. En el cuadro 13 se presentan estos resultados, en el que se utilizan las siguientes tasas de descuento: 0,5%, 2%, 4% y 8%. Como se observa, los impactos al año 2100 significarían una pérdida que iría en alrededor de 0,5% del PIB de 2007, considerando una tasa de descuento de 4%.

Gráfico 9
ISTMO CENTROAMERICANO: PROYECCIONES DE LOS ÍNDICES DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA A PARTIR DEL ESCENARIO A2

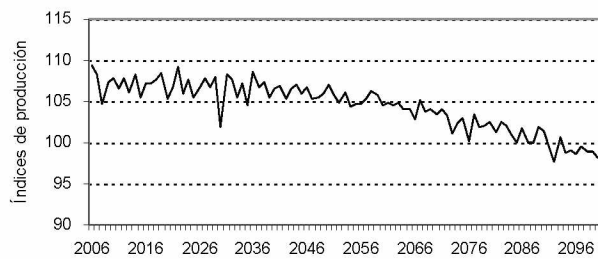
Índice de producción agropecuaria ante el cambio climático a partir del escenario A2



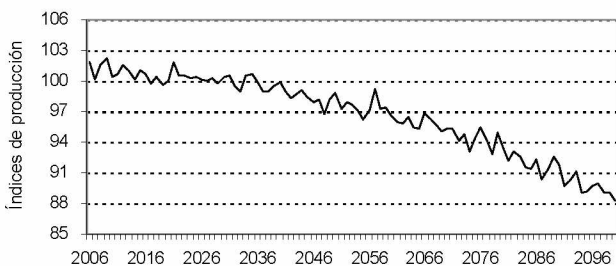
Índice de producción de cultivos ante el cambio climático a partir del escenario A2



Índice de producción de cereales ante el cambio climático a partir del escenario A2



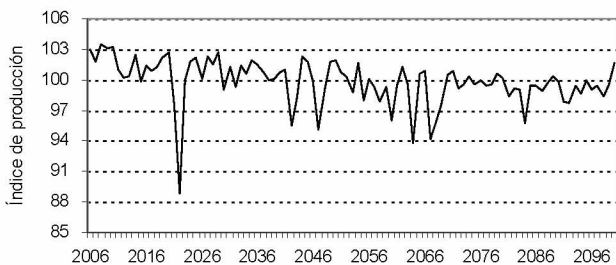
Índice de producción pecuaria ante el cambio climático a partir del escenario A2 (sólo cambios en temperatura)



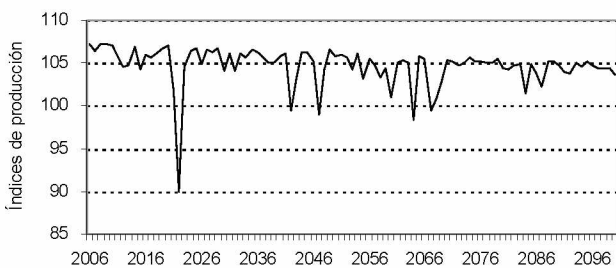
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10
ISTMO CENTROAMERICANO: PROYECCIONES DE LOS ÍNDICES DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA A PARTIR DEL ESCENARIO B2

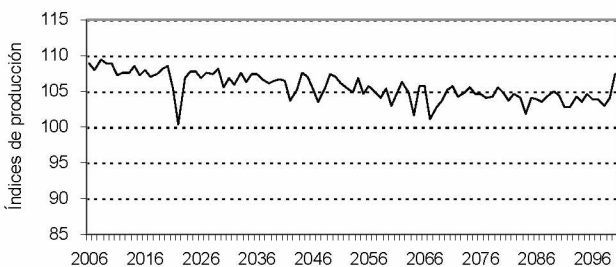
Índice de producción agropecuaria ante el cambio climático a partir del escenario B2



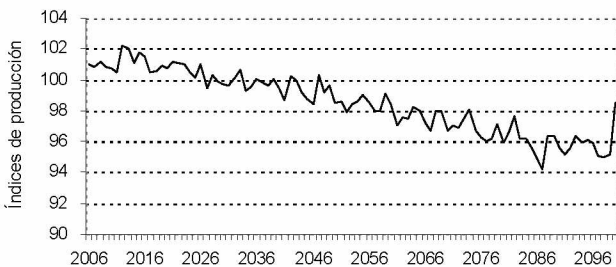
Índice de producción de cultivos ante el cambio climático a partir del escenario B2



Índice de producción de cereales ante el cambio climático a partir del escenario B2

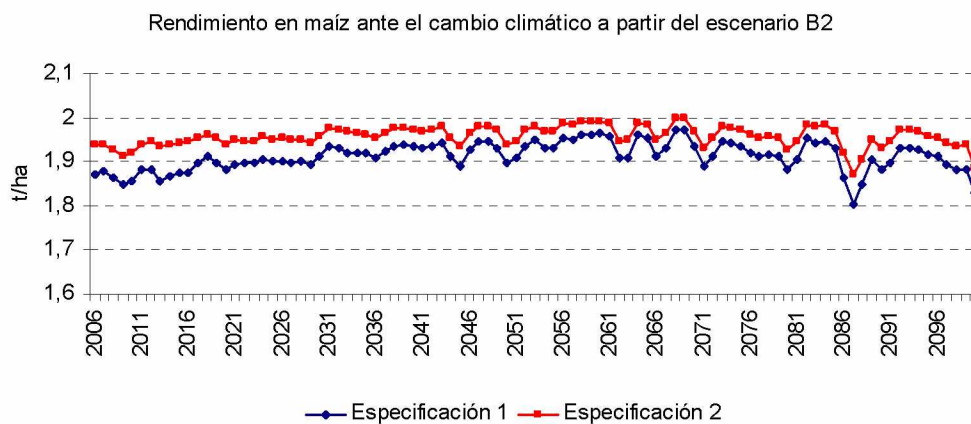
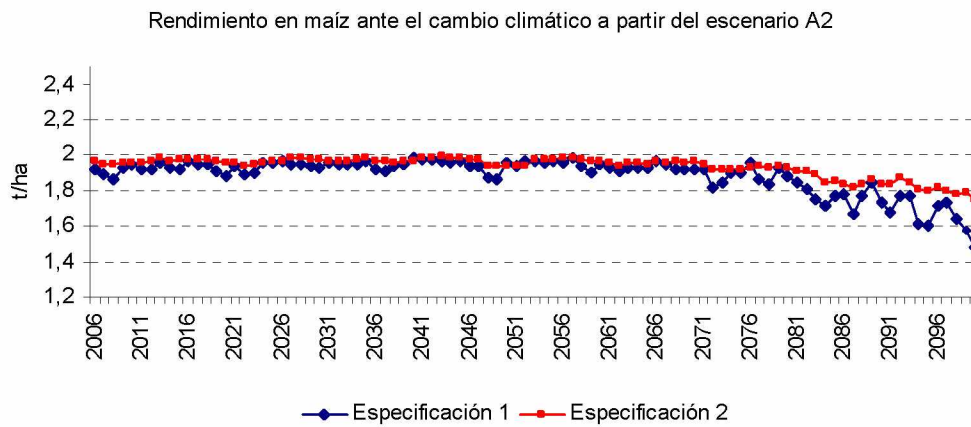


Índice de producción pecuaria ante el cambio climático a partir del escenario B2 (sólo cambios en temperatura)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11
ISTMO CENTROAMERICANO: PROYECCIONES DE LOS RENDIMIENTOS
DEL MAÍZ A PARTIR DEL ESCENARIO A2 Y B2



Fuente: Elaboración propia.

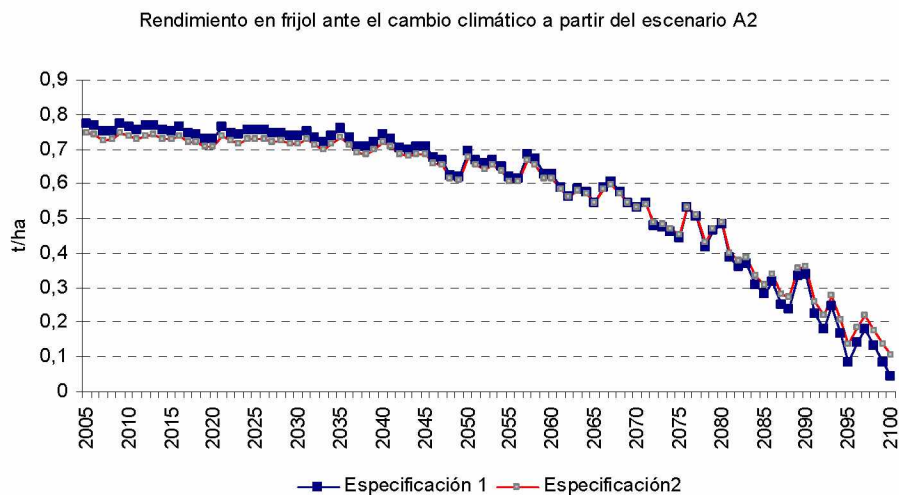
La evolución del rendimiento en arroz, a partir de las estimaciones anteriores y de los escenarios A2 y B2, se presentan en el gráfico 13, en el que se muestra que en el corto plazo la producción por hectárea se mantendría relativamente estable, pudiendo incluso incrementar, quizá porque como se mostró antes, el nivel de temperatura actual es cercano al que permite la producción máxima. Sin embargo, a largo plazo, la producción tendería a descender, tal como lo muestran los dos escenarios bajo las dos especificaciones empleadas.

Cuadro 12
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA PRODUCCIÓN DEL MAÍZ COMO PORCENTAJE DEL PIB DE 2007

Año	ESCENARIO A2				ESCENARIO B2			
	Especificación 1				Especificación 1			
	Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)			
	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08
2020	0,12	0,11	0,10	0,08	0,18	0,17	0,15	0,13
2030	0,14	0,12	0,11	0,09	0,20	0,18	0,16	0,13
2050	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08	0,11	0,12	0,12
2070	0,17	0,13	0,11	0,09	-0,14	0,01	0,09	0,11
2100	1,57	0,54	0,19	0,09	-0,14	0,00	0,08	0,11
	Especificación 2				Especificación 2			
2020	0,09	0,08	0,07	0,06	0,13	0,12	0,11	0,09
2030	0,12	0,11	0,09	0,07	0,15	0,14	0,12	0,10
2050	0,22	0,16	0,12	0,08	0,12	0,12	0,11	0,09
2070	0,31	0,20	0,13	0,08	0,03	0,07	0,09	0,09
2100	1,32	0,50	0,19	0,08	0,13	0,10	0,10	0,09

Fuente: Elaboración propia.

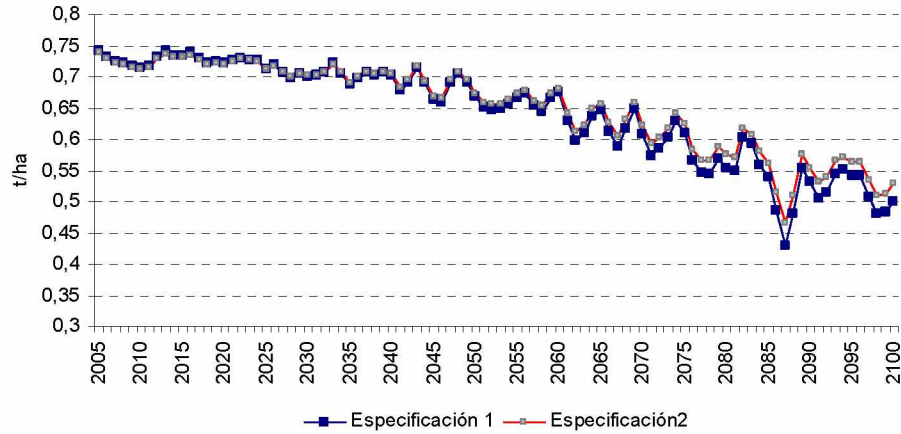
Gráfico 12
ISTMO CENTROAMERICANO: PROYECCIONES DE LOS RENDIMIENTOS DEL FRIJOL
A PARTIR DEL ESCENARIO A2 Y B2



(Continúa)

Gráfico 12 (Conclusión)

Rendimiento en frijol ante el cambio climático a partir del escenario B2



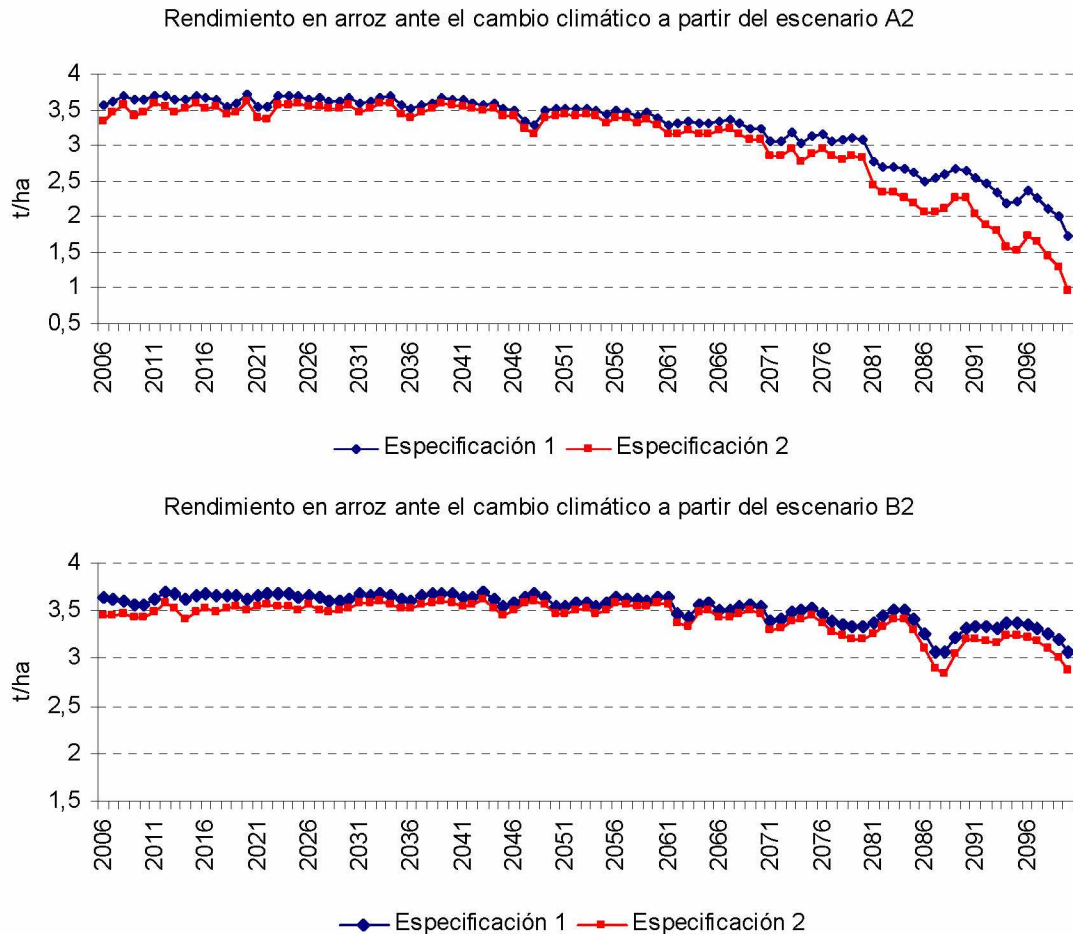
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 13
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DEL FRIJOL COMO PORCENTAJE DEL PIB DE 2007

Año	ESCENARIO A2				ESCENARIO B2			
	Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)			
	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08
	Especificación 1				Especificación 1			
2020	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03
2030	0,10	0,08	0,06	0,04	0,10	0,08	0,06	0,04
2050	0,44	0,28	0,16	0,07	0,34	0,22	0,14	0,06
2070	1,27	0,64	0,29	0,08	0,85	0,45	0,21	0,07
2100	4,41	1,59	0,49	0,09	2,18	0,85	0,30	0,08
	Especificación 2				Especificación 2			
2020	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2030	0,08	0,06	0,05	0,03	0,06	0,05	0,04	0,02
2050	0,37	0,23	0,13	0,05	0,25	0,16	0,09	0,04
2070	1,08	0,54	0,24	0,06	0,66	0,34	0,16	0,05
2100	3,79	1,36	0,41	0,07	1,79	0,69	0,23	0,05

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 13
ISTMO CENTROAMERICANO: PROYECCIONES DE LOS RENDIMIENTOS DEL ARROZ
A PARTIR DEL ESCENARIO A2 Y B2



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de impactos de las variaciones en la producción del arroz, ante cambio climático, señala que éstos al año 2100 podrían estar en un rango de 0,05% a 0,22% del PIB de 2007, con una tasa de descuento de 4% (véase el cuadro 14).

3. Proyecciones e impactos sobre la renta de la tierra (ganancias agrícolas)

En esta sección se emplean los resultados de las regresiones estimadas anteriormente, incluidas en el cuadro 9 para los dos primeros modelos, y con ello se explora de qué manera los cambios futuros en el clima pueden afectar las ganancias agrícolas de los hogares rurales de Honduras. Los resultados muestran que los valores de las ganancias varían a lo largo de los diferentes municipios de Honduras. Los efectos marginales calculados indican que un pequeño cambio en la temperatura perjudica a la producción agrícola hondureña. En este sentido, se explora la magnitud de los impactos cuando los cambios climáticos se manifiesten en años venideros. Las estimaciones asumen que el resto de las condiciones se

mantienen constantes, y de esa forma se pretende aislar el efecto del cambio climático sobre las ganancias agrícolas mediante las variables de temperatura y precipitación. En cuanto a este punto, cabe señalar que no se toman en cuenta los cambios probables en precios, inversión, población y tecnología.

Cuadro 14
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA PRODUCCIÓN DEL ARROZ COMO PORCENTAJE DEL PIB DE 2007

Año	ESCENARIO A2				ESCENARIO B2			
	Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)			
	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08
	Especificación 1				Especificación 1			
2020	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03
2030	0,05	0,05	0,04	0,03	0,06	0,05	0,04	0,03
2050	0,20	0,13	0,08	0,04	0,09	0,07	0,05	0,03
2070	0,52	0,27	0,13	0,04	0,21	0,12	0,07	0,04
2100	2,04	0,72	0,22	0,05	0,69	0,27	0,10	0,04
	Especificación 2				Especificación 2			
2020	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03
2030	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02
2050	0,07	0,04	0,03	0,02	-0,03	-0,01	0,01	0,02
2070	0,34	0,16	0,07	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02
2100	2,19	0,71	0,18	0,03	0,44	0,14	0,04	0,02

Fuente: Elaboración propia.

Nuestra proyección considera un escenario climático de precipitación acumulada y temperatura media anual a nivel de los municipios hondureños. El modelo utilizado para predecir las anomalías del clima en años futuros es el Miroc de alta resolución bajo el escenario A1B. Para evaluar el efecto futuro del clima sobre las ganancias agrícolas, se han considerado como puntos de referencia o de corte los años 2020, 2030, 2050, 2070 y 2095.

La temperatura promedio anual y la precipitación acumulada anual históricas, que se consideran como base de referencia, son 23,48° C y 1.513,59 mm, respectivamente, si bien es importante señalar que la distribución de los cambios en temperatura y precipitación varían a los largo de los municipios hondureños.

Para realizar nuestras predicciones, se han considerado las dos primeras especificaciones comentadas en la sección 3 del capítulo anterior (véase el cuadro 9). Inicialmente, se calcula el valor esperado de las ganancias agrícolas para cada hogar y posteriormente se estima el impacto total promedio para 2020, 2030, 2050, 2070 y 2095, tal como se señaló en la ecuación (17) del capítulo metodológico de este estudio.

En el cuadro 15 se presenta el monto de las ganancias agrícolas futuras junto con la variación porcentual estimada con respecto al monto promedio actual. Lo anterior para cada uno de los años de corte considerados en este análisis. Es posible observar que en todos los casos el efecto es negativo, anticipando una disminución gradual en las ganancias agrícolas para los distintos periodos futuros.

Cuadro 15
IMPACTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS GANANCIAS
AGRÍCOLAS DE HOGARES RURALES HONDUREÑOS^a

Año	Modelo I	Modelo II
	Ganancias agrícolas actuales y futuras (dólares)	
2003	46,49	46,49
2020	44,14	32,85
	(-5,05%)	(-29,34%)
2030	46,79	34,07
	(0,65%)	(-26,72%)
2050	42,85	30,53
	(-7,83%)	(-34,33%)
2070	45,54	30,92
	(-2,04%)	(-33,49%)
2095	44,34	28,71
	(-4,62%)	(-38,24%)

Fuente: Elaboración propia.

^a Los impactos son cambios en las ganancias agrícolas mensuales (dólares). Los cambios porcentuales con respecto al año base se encuentran entre paréntesis.

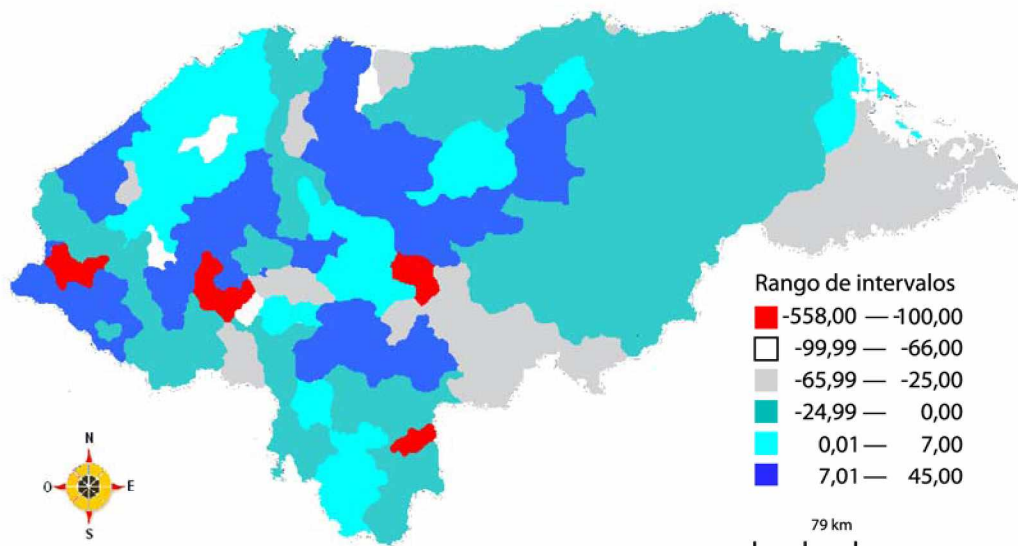
En las proyecciones del modelo I, para 2020 se encuentra que un aumento de la temperatura media anual de 1,71° C y una disminución de la precipitación acumulada de 25,1 mm, en relación con los valores medios históricos, implican una reducción de 5,05% de las ganancias agrícolas, mientras que el modelo II, que incluye variables por tipo de suelo, predice una baja del orden de 29,3%.

Para el año 2050 se observa un incremento de la temperatura media anual de 3,19° C y una disminución de 87,71 mm en la precipitación acumulada. Estos cambios implican una contracción de 7,8% en las ganancias agrícolas bajo el modelo I, mientras que el modelo II pronostica una reducción de 34,3%.

Asimismo, para el año 2095 se genera un aumento de la temperatura media anual de 6,02° C y una baja de la precipitación acumulada de 409,91 mm con respecto a los valores medios históricos. Lo anterior conlleva a una disminución de 4,6% de las ganancias agrícolas en el modelo I, mientras que el modelo II predice una baja del 38,2%. Las diferencias entre las especificaciones de los modelos I y II radican en que la segunda especificación captura el efecto diferenciado por el tipo de suelo, en conjunto con las variables de temperatura y precipitación.

De manera adicional, los resultados obtenidos se presentan gráficamente en los mapas 1, 2 y 3, donde se muestra la distribución de los cambios en las ganancias agrícolas para los municipios de Honduras en los años 2020, 2050 y 2095, utilizando los resultados econométricos del modelo II y evaluando los resultados de impacto a nivel municipal. En estos mapas es posible notar que el efecto es diferenciado a lo largo de las comunidades hondureñas. No obstante, es posible recalcar que el efecto negativo en las ganancias agrícolas, que surge de manera conjunta por el aumento en la temperatura media anual y la baja en la precipitación acumulada anual, se permean prácticamente en todo el territorio hondureño.

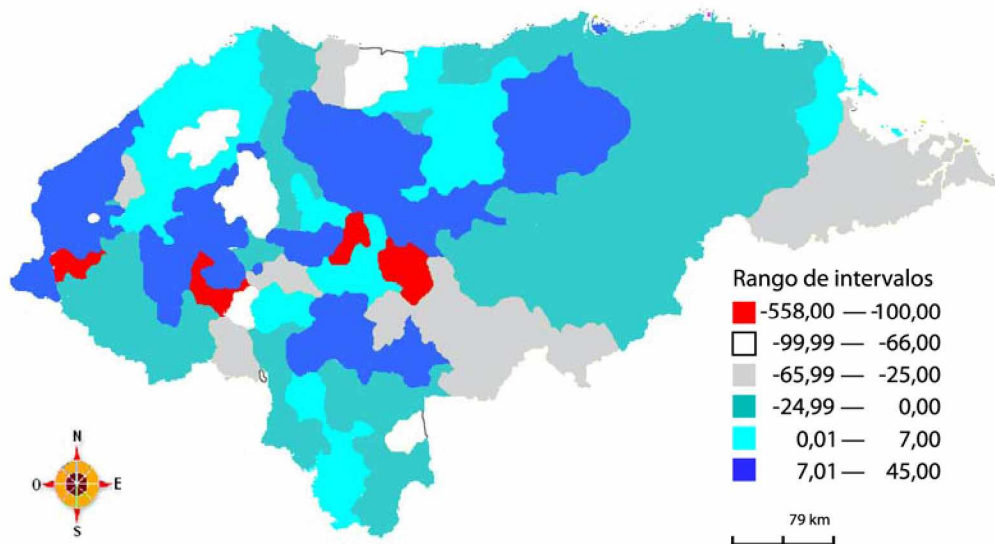
Mapa 1
DISTRIBUCIÓN DE LOS IMPACTOS A NIVEL MUNICIPAL SOBRE LAS GANANCIAS AGRÍCOLAS
PARA EL AÑO 2020



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

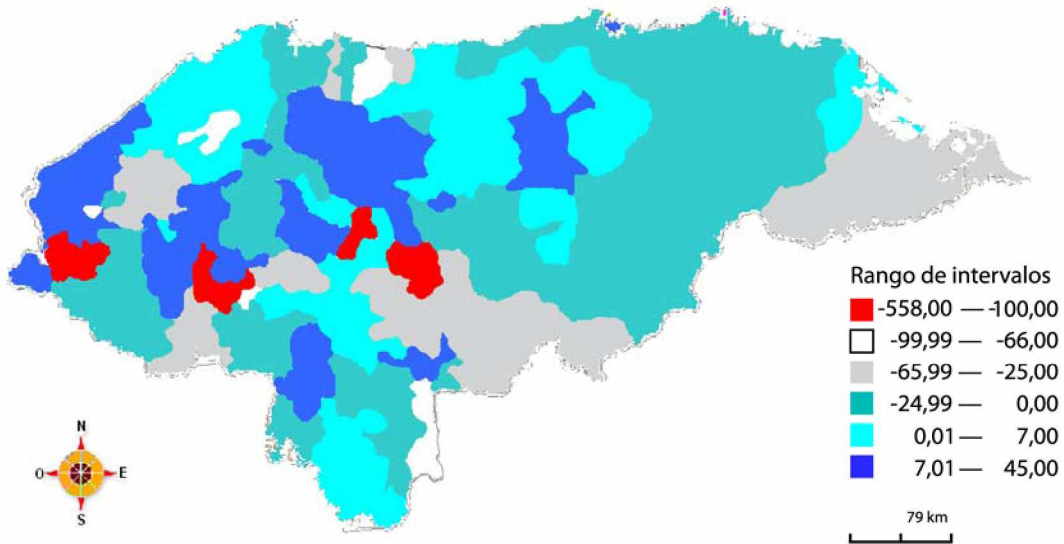
Mapa 2
DISTRIBUCIÓN DE LOS IMPACTOS A NIVEL MUNICIPAL SOBRE LAS GANANCIAS AGRÍCOLAS
PARA EL AÑO 2050



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Mapa 3
DISTRIBUCIÓN DE LOS IMPACTOS A NIVEL MUNICIPAL SOBRE LAS GANANCIAS AGRÍCOLAS
PARA EL AÑO 2095



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

VI. CONCLUSIONES

La derivación de los modelos de funciones de producción muestra que el cambio climático producirá efectos negativos sobre la producción agropecuaria del Istmo Centroamericano. La consecuencia directa de los cambios en temperatura y precipitación será el deficiente suministro de alimentos en la región, así como pérdidas económicas. Estas pérdidas al 2100 representan una porcentaje de alrededor de 19% del PIB de 2007 (escenario A2 con una tasa de descuento de 0,05%).

Los resultados de los ejercicios empíricos realizados revelan los efectos adversos sobre los rendimientos de los productos agrícolas, que se traducirían en pérdidas económicas importantes. Se analizaron tres de los productos más importantes en la región: maíz, frijol y arroz. De acuerdo con los resultados, en la producción de frijol es donde se presentarían las mayores pérdidas económicas, seguida de la producción de arroz y por último del maíz.

El análisis Ricardiano de Honduras, realizado a partir de los modelos base utilizados, evidencian, bajo un nivel de confianza alto, que las ganancias agrícolas en Honduras son sensibles al clima, ya que un incremento marginal en la temperatura promedio anual de un grado Celsius reduce las ganancias agrícolas anuales en aproximadamente 26 dólares. En otras palabras, un ligero aumento en la temperatura conlleva un impacto negativo hacia la agricultura hondureña. Así, cuando la temperatura se eleve en 2 grados Celsius las ganancias agrícolas mensuales promedio disminuirían en alrededor de 9%, lo que representa para los hogares rurales hondureños cerca del 3% de su ingreso mensual total. Este impacto es mucho mayor para los primeros dos deciles de los hogares rurales (57% de su ingreso); en cambio, es considerablemente menor para el 20% de los hogares rurales con mayores ingresos (cerca de 1% de su ingreso total). De igual manera, un incremento en la precipitación acumulada anual de 10 mm implica una contracción de las ganancias agrícolas de aproximadamente 0,20 dólares.

El análisis Ricardiano también consideró los impactos de futuros cambios en el clima, los cuales no muestran un escenario alentador sobre los ingresos provenientes del sector agrícola hondureño. Los impactos de las proyecciones futuras predicen efectos negativos que van desde el 2% hasta cerca del 40% de las ganancias agrícolas. De manera adicional, es posible observar que estos efectos presentan una dispersión considerable a través de las distintas regiones del territorio hondureño.

Si bien es cierto que en este trabajo no se toma en cuenta la posible adaptación que los individuos y sus parcelas puedan experimentar ante las variaciones de temperatura y precipitación, resulta importante subrayar el mensaje de impacto negativo atribuible a un aumento en la temperatura y/o precipitación, que debe tomarse en consideración para desarrollar e implementar las medidas de política necesarias y adecuadas a fin de enfrentar los efectos adversos de las variaciones climáticas sobre las ganancias agrícolas de los hogares hondureños.

Los impactos negativos del cambio climático sobre la economía de los países del Istmo Centroamericano son significativos, como se demostró en el enfoque de las funciones de producción. La región del Istmo Centroamericano depende fundamentalmente de su producción agropecuaria, no sólo para su seguridad alimentaria, sino también porque un porcentaje importante de sus exportaciones corresponden a cultivos que se verán afectados. Sin embargo, el impacto principal será sobre los

agricultores de subsistencia, los cuales representan en la región 59,4%²³ de los productores totales. Estos pequeños productores poseen tan sólo 6,5% de la superficie cultivada, y esta proporción de tierra, en su mayoría, es de bajos rendimientos. Asimismo, estos agricultores no cuentan con tecnologías ni riego, que les permita enfrentar los efectos adversos del cambio climático.

La disminución en la producción ocasionará pérdidas económicas importantes, ya que no se tendrán los recursos suficientes para compensarla; es en este sector de la población donde se esperan los mayores impactos negativos, pues dependen de cultivos que eventualmente serán muy afectados, como los granos básicos (frijol, maíz y arroz). Las condiciones de pobreza de los agricultores los hacen muy vulnerables a los impactos del cambio climático. Como señala Altieri y Nicholls (2009) para estos agricultores, aun los menores cambios en el clima pueden tener un impacto desastroso en sus vidas y medios de sustento.

Bajo el escenario desalentador y la falta de recursos hay que buscar estrategias viables, sobre todo para los agricultores pobres vulnerables. En el trabajo de Altieri y Nicholls (2009) se señala que en algunas áreas del mundo los campesinos han desarrollado sistemas agrícolas adaptados a las condiciones locales que les permiten una producción continua necesaria para subsistir, a pesar de cultivar en ambientes marginales, con variabilidad climática no predecible y un uso muy bajo de insumos externos. Bajo este esquema, muchos de los sistemas agrícolas tradicionales alrededor del mundo sirven como modelos de sostenibilidad que ofrecen ejemplos de medidas de adaptación que pueden ayudar a millones de pobladores rurales a reducir su vulnerabilidad al impacto del cambio climático. Los autores señalan las siguientes estrategias de adaptación:

- 1) Uso de variedades/especies adaptadas localmente, mostrando adaptaciones más apropiadas al clima y a los requerimientos de hibernación o resistencia incrementada al calor y la sequía.
- 2) Incremento del contenido de materia orgánica de los suelos mediante la aplicación de estiércol, abonos verdes, cultivos de cobertura, con miras a una mayor capacidad de retención de humedad.
- 3) Un uso más amplio de tecnologías de “cosecha” de agua, conservación de la humedad del suelo mediante *mulching*, y un uso más eficiente del agua de riego.
- 4) Manejo adecuado del agua para evitar las inundaciones, la erosión y lixiviación de nutrientes cuando la precipitación pluvial aumenta.
- 5) Uso de estrategias de diversificación como cultivos intercalados, agroforestería, entre otros, e integración animal.
- 6) Prevención de plagas, enfermedades e infestaciones de malezas mediante prácticas de manejo que promueven mecanismos de regulación biológica y otros (antagonismos, antagonismos, alelopatía, etc.), y desarrollo y uso de variedades y especies resistente a plagas y enfermedades.
- 7) Uso de indicadores naturales para el pronóstico del clima a fin de reducir riesgos en la producción.

²³ Fuente: CEPAL, sobre la base de cifras oficiales de los Censos Agropecuarios de Costa Rica, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá. El Salvador MAGA/OPA, Estudio Nacional del Sector Agropecuario, Encuesta sobre Uso y Tenencia de la Tierra .

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, Richard, B. Hurd, J. Reilly (1999), "A review of impacts to U.S. agricultural resources", preparado para el Pew Center on Global Climate Change.
- Adams, Richard y otros (1998), "Effects of global climate change on agriculture: An interpretative review", *Climate Research*, II: 19-30.
- _____ (1990), "Global climate change and US agriculture", *Nature*, 345: 219-223.
- _____ (1988), "Implications of global climate change for western agriculture", *Western Journal of Agricultural Economics*, 13 (2): 348-356.
- Alfaro, W. y L. Rivera (2008), *Cambio climático en Mesoamérica: temas para la creación de capacidades y la reducción de la vulnerabilidad*, Fundación Futuro Latinoamericano.
- Altieri, M. y C. Nicholls (2009), "Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas", *Leisa Revista de Agroecología*, marzo.
- Audesirk, Teresa (2003), *Biología: La vida en la Tierra*, Prentice Hall México.
- Backlund, Peter, Anthony Janetos y David Schimel (2009), Managing Editor: Margaret Walsh, "The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States", *Synthesis and Assessment Product 4.3 Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, U. S. Global Change Research Program, Global Climate Change Impacts in the United States, Agriculture*, Cambridge University Press.
- Baker, B. B. y otros (1993), "The potential effects of climate change on ecosystem processes and cattle production on US Rangelands", *Climatic Change*, 23: 97-117.
- Baltagi, B. (2005), *Econometric Analysis of Panel Data*, 3ª ed., John Wiley & Sons Ltd.
- Banco Central de Belice (2009), *Reportes anuales, varios años, del 2004 al 2008*.
- Banco Central de Honduras (2009), *Boletín estadístico mensual*, diciembre de 2008.
- _____ (2009) *Honduras en cifras, 2002-2008*
- _____ (2009), *Informe de Comercio Exterior, 2008*.
- Banco Central de Nicaragua (2009), *Indicadores económicos mensuales*, junio.
- Banco Central de Reserva de El Salvador (2009), *Revista trimestral*, octubre-diciembre de 2008.
- Banco de Guatemala (2009), *Boletín Estadístico*, diciembre de 2008.
- _____ (2009) *Boletín de estadísticas agrícolas y pecuarias, 2008*.
- CAC (Consejo Agropecuario Centroamericano) (2007), "Política Agrícola Centroamericana 2008-2017", *Una agricultura competitiva e integrada para un mundo global*, San José, Costa Rica.
- _____ (2002), *Estrategia para el manejo de la sequía en el sector agropecuario de Centroamérica*, San José, Costa Rica, enero.
- CCAD (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo) (2008), *Lineamientos de la Estrategia Regional de Cambio Climático*, San Salvador, El Salvador, abril.
- _____ (2007), "Política agrícola centroamericana 2008-2017", *Una agricultura competitiva e integrada para un mundo global*, San José, Costa Rica.
- _____ (2005), Plan Ambiental de la Región Centroamericana (PARCA), aprobado por el Consejo de Ministros de la CCAD en su XL Reunión Ordinaria, celebrada en Managua el 28 de julio.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2009), *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe, 2008*.
- _____ (2009), *Balance preliminar de las economías de América Latina y el Caribe, 2008*.
- _____ (2009), *Preliminary overview of the Caribbean, 2008-2009 (LC/CAR/L.189)*, marzo.
- _____ (2009), *Anexos estadísticos de las notas económicas*.
- _____ (2008), *Economic Survey of the Caribbean, 2007-2008 (LC/CAR/L.173)*, julio.

- CGR (Contraloría General de la República) (2009), *Boletín de granos básicos y boletín de información pecuaria, 2008*, Panamá.
- _____ (2009), *Encuesta de Empleo, 2008*.
- _____ (2009), *Sistema de Consulta de Estadísticas de Comercio Exterior*.
- Cline, W. R. (2007), *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*, Center for Global Development and Peterson Institute for International Economics, Washington, D. C.
- De la Torre, P., P. Fajnzylber y J. Nash (2009), *Desarrollo con menos carbono: respuestas latinoamericanas al desafío del cambio climático*, Banco Mundial, Washington, D. C.
- DIGESTYC (Dirección General de Estadística y Censos) (2008), *Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples, 2007*, El Salvador.
- Espinoza, Gatica y Smyle (1999), *El pago de servicios ambientales y el desarrollo sostenible en el medio rural*, San José Costa Rica, Serie de Publicaciones RUTA, RUTA e IICA, junio.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2003a), *World Agriculture: Towards 2015/2030. A FAO Perspective*, Roma.
- _____ (2003b), *The Digital Soil Map of the World (DSMW) CD-ROM*, Roma.
- Finger, R. y S. Schmid (2007), *Modelling Agricultural Production Risk and the Adaptation to Climate Change*, inédito.
- Fleischer, A., I. Lichtman y R. Mendelsohn (2007), *Climate Change, Irrigation, and Israeli Agriculture: Will Warming be Harmful?*, Policy Research Working Paper, No. 4135, Banco Mundial.
- Fournier, L. y J. di Stefano (2004), “Variaciones climáticas entre 1988 y 2001 y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas y el manejo de un cafetal con sombra en ciudad Colón de Mora”, *Agronomía Costarricense*, 28 (001): 101-120, Costa Rica.
- Galindo, L. (2009) “La economía del cambio climático en México”, *Gobierno Federal, SHCP y SEMARNAT*.
- Gay, C. y otros (2004), “Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz”, México, inédito.
- Harmeling, S. (2007), *Global Climate Risk Index 2008*, Germanwatch [en línea] <<http://www.germanwatch.org/klima/cri.htm>>.
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (2008), *Encuesta Agropecuaria Básica*, Honduras.
- _____ (2007), *Encuesta Permanente de Hogares*, Honduras.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos) (2008), *Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples*, Costa Rica.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos) (2009), *Encuesta de Empleo*, Nicaragua.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) (2005), “Potencial productivo agrícola de la región valles de Jalisco”, INIFAP, SAGARPA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, pág. 104.
- Klinedinst, P. L. y otros (1993), “The potential effects of climate change on summer season dairy cattle milk production and reproduction”, *Climatic Change*, 23(1): 21-36.
- Leary, N., J. Kulkarni y C. Seipt (2007), *Assessment of Impacts and Adaptation to Climate Change (AIACC): Final Report*, AIACC Implementing Agency of the United Nations Environment Programme (UNEP), Washington, D. C.
- Maddison, D., M. Manley y P. Kurukulasuriya (2007), “The impact of climate change on African agriculture. A Ricardian approach”, *Policy Research Working Paper*, 4306, Banco Mundial.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería) (2008), *Información del Sector Agropecuario, 2007*, El Salvador.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación), Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPI) (2007), *Estadísticas de Producción Agropecuaria*, Guatemala.

- MAGA/OPA (Ministerio de Agricultura y Ganadería y Oficina de Planificación Agropecuaria) (1989), “Estudio nacional del sector agropecuario”, *Encuesta sobre uso y tenencia de la tierra*, El Salvador.
- MAGFOR (Ministerio Agropecuario y Forestal) (2008), *Información estadística anual de producción agropecuaria (Ciclo agrícola 2006/2007 y período pecuario 2008)*, Nicaragua.
- McCarl, B., R. Adams y B. Hurd (2001), *Global Climate Change and its Impact on Agriculture*, inédito.
- Mendelsohn, R., P. Christensen y J. Arellano-González (2009), *Ricardian Analysis of Mexican Farms*, informe al Banco Mundial.
- Mendelsohn, R. (2007), “Past climate change impacts on agriculture”, en R. Evenson y P. Pingali (comps.), *Handbook of Agricultural Economics*, vol. 3, 3008-3031.
- Mendelsohn, R. y otros (2007), Climate and rural income, *Climatic Change*, 81:101-118.
- Mendelsohn, R. y S. N. Seo (2007), “Changing farm types and irrigation as an adaptation to climate change in Latin American agriculture”, *Policy Research Series Working Paper*, N° 4161, Banco Mundial.
- Mendelsohn, R., A. Dinar y A. Sanghi (2001), “The effect of development on the climate sensitivity of agriculture”, *Environment and Development Economics*, 6:85-101.
- Mendelsohn, R., W. Nordhaus y D. Shaw (1994), “The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis”, *American Economic Review*, 84:753-771.
- Metz, B. y otros (2007), *Climate Change 2007, Mitigation of Climate Change*, IPCC.
- MIDA (Ministerio de Desarrollo Agropecuario) (2008), *Cartilla Agropecuaria, 2007*, Panamá.
- Ministerio de Economía y Finanzas (2009), Dirección de Análisis y Políticas Económicas, *Informe económico anual, 2008*, Panamá.
- Molua, E. y C. Lambi (2007), “The economic impact of climate change on agriculture in Cameroon”, *Policy Research Working Paper*, N° 4364, Banco Mundial.
- Monterrosa de Tobar, M. (1998), “Evaluación de los impactos del cambio climático en el sector agropecuario de la zona costera de El Salvador”, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Mora, J. J. y A. Yúnez-Naude (2008), “Climate change and migration in rural Mexico”, informe al Banco Mundial, Latin American Division.
- Parry, M. L. y otros (2004), “Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios”, *Global Environmental Change*, 14: 53-67.
- PNUMA (Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2004), “Carpeta de Información sobre el cambio climático”, octubre.
- PROCOMER (Promotora de Comercio Exterior) (2009), *Estadísticas de exportación, 2008*, Costa Rica.
- Rosenzweig, C. y M. Parry (1994), “Potential impact of climate change on world food supply”, *Nature*, 367: 133-138.
- SAG (Secretaría de Agricultura y Ganadería), INFOAGRO (Información Agrícola) (2006), *Información sobre el sector agropecuario*, Honduras.
- Schimmelpfennig, D. y otros (1996), *Agricultural Adaptation to Climate Change: Issues of Long Run Sustainability*, U. S. Department of Agriculture, Natural Resources and Environment Division, Economic Research Service, Washington, D. C.
- Schlenker, W., W. Hanemann y A. Fischer (2006), “The impact of global warming on US agriculture: An econometric analysis of optimal growing conditions”, *The Review of Economics and Statistics*, 88 (1): 113–125.
- Seo, S. N., R. Mendelsohn y M. Munasinghe (2005), “Climate change and agriculture in Sri Lanka: A Ricardian Valuation”, *Environment and Development Economics*, 10:581-596.

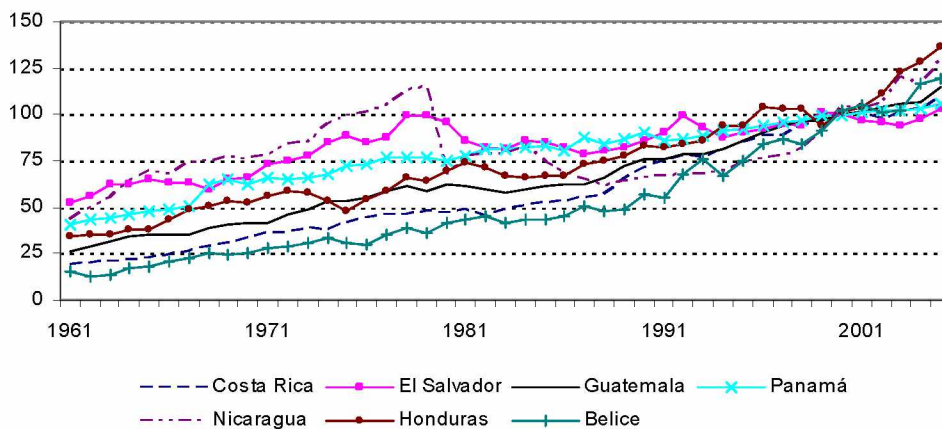
- Seo, S. N. y R. Mendelsohn (2008a), "A Ricardian analysis of the impact of climate change on Latin American farms", *Policy Research Series Working Paper*, N° 4163, Washington, D. C., Banco Mundial.
- _____ (2008b), "A Ricardian analysis of the impact of climate change on South American farms", *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(1): 69-79.
- _____ (2008c), "An analysis of crop choice: Adapting to climate change in Latin American Farms", *Ecological Economics*, 67: 109-116.
- _____ (2008d), "Measuring impacts and adaptations to climate change: A structural Ricardian model of African Livestock Management", *Agricultural Economics*, 38:151-165.
- _____ (2006), "Climate change impacts on animal husbandry in Africa: A Ricardian analysis", *World Bank Policy Research Working Paper*, No. 4621, Washington, D. C.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria) (2009), *Boletín Estadístico Agropecuario*, N° 19, Costa Rica.
- Sergendon, Kathleen, B. L. Dixon (1998) "Climate change and agriculture: The role of farmer adaptation. Capítulo 3, *The Economics of Climate Change*, R. Mendelsohn y J. Neumann, eds., Cambridge University Press, Cambridge.
- Smit, B., D. McNabb y J. Smithers (1996), "Agricultural adaptation to climatic variation", *Climatic Change*, 33:7-29.
- Terjung, W. H., D. M. Liverman y J. T. Hayes (1984), "Climate change and water requirements for grain corn in the North American plains", *Climatic Change*, 6: 193-220.
- Vega, E. y L. Gámez (2003), "Implicaciones económicas de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica: 1996-2001", inédito.
- Warrick, R. A. (1984), "The possible impacts on wheat production of a recurrence of the 1930's drought in the great plains", *Climatic Change*, 6: 5-26.
- Wild, Alan (1992), *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*, Mundi-Prensa.

ANEXOS

Anexo I

Gráfico I-1

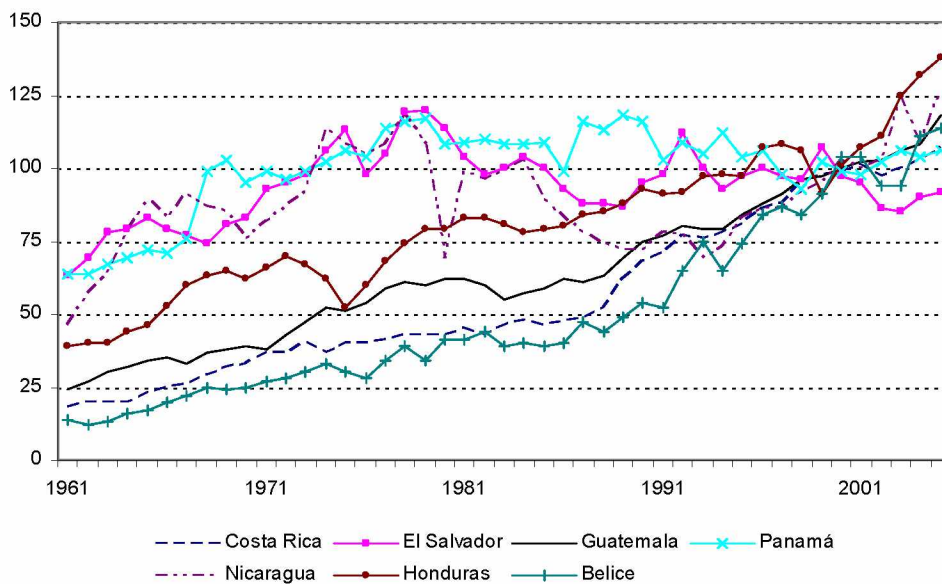
ISTMO CENTROAMERICANO: ÍNDICE DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA, 1961-2005



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico I-2

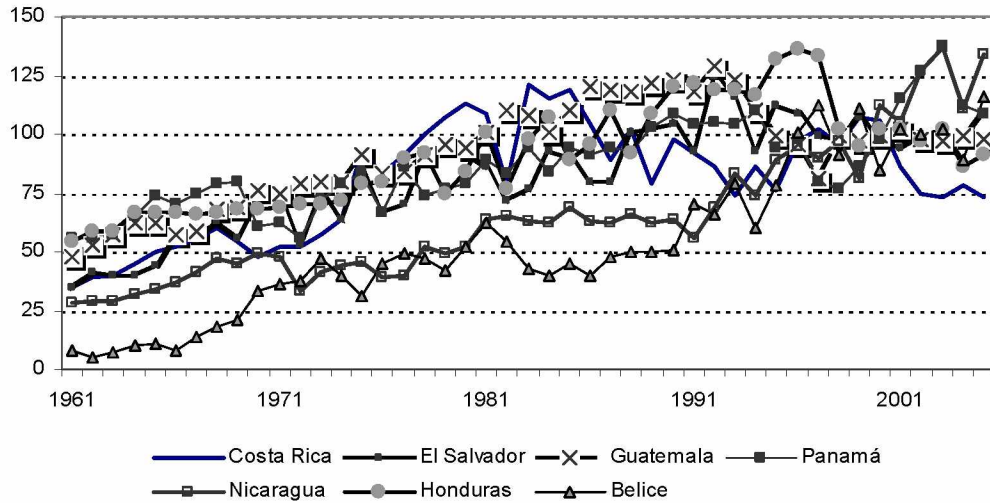
ISTMO CENTROAMERICANO: ÍNDICE DE PRODUCCIÓN DE CULTIVOS, 1961-2005



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico I-3

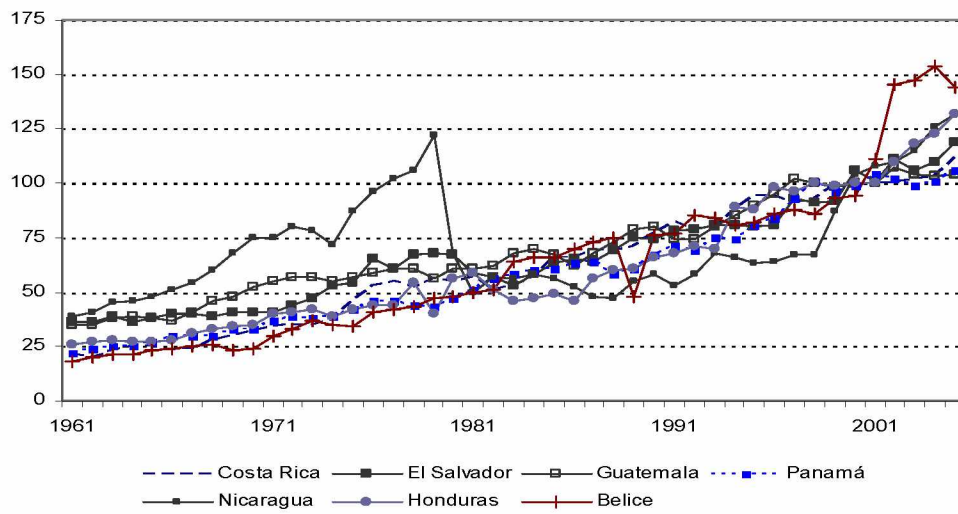
ISTMO CENTROAMERICANO: ÍNDICE DE PRODUCCIÓN DE CEREALES, 1961-2005



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico I-4

ISTMO CENTROAMERICANO: ÍNDICE DE PRODUCCIÓN PECUARIA, 1961-2005



Fuente: Elaboración propia.

Anexo II

EMISIONES DE CO₂

Para ejemplificar, se realizaron estimaciones de las funciones de producción agropecuaria y cultivos con la precipitación acumulada en la época de lluvias y emisiones de CO₂. Es importante tomar en cuenta lo complejo que resulta efectuar un análisis de las consecuencias del aumento de las emisiones de CO₂. Los resultados se presentan en el cuadro A II-1. También se incluyeron términos cuadráticos para capturar el efecto no lineal de ambas variables en las funciones de producción. Los signos de las variables precipitación y emisiones de CO₂ son los esperados y ambos son significativos. Las estimaciones muestran que niveles mayores de emisión de 7,6 millones de toneladas ocasionarán pérdidas en la producción agrícola (Véanse los gráficos II-1 y II-2.)

Cuadro II-1
ESTIMACIONES DEL MODELO DE MCO DE
ÍNDICE DE PRODUCCIÓN

	Agropecuaria	Cultivos
Tendencia	0,6591142 (2,52) **	0,3664403 (2,22) **
Tendencia ²	0,0100926 -1,76	
Precipitación acumulada en época de lluvias	0,0439372 (12,18) ***	0,0831884 (7,28) ***
Precipitación acumulada en época de lluvias ²	-0,0000149 (10,33) ***	-0,0000271 (8,15) ***
Emisiones de CO ₂	8,034438 (6,83) ***	13,7635 (8,18) ***
Emisiones de CO ₂ ²	-0,5307181 (4,68) ***	-0,9286919 (5,94) ***
Superficie de tierra arable y cultivos permanentes	0,0029398 (2,11) **	0,0058016 (2,03) **
Participación de PEA rural / PEA total		-47,52142 (2,44) **
Observaciones	315	315
R ^{2a}	70,0	51,0

Fuente: Elaboración propia.

Valores absolutos del t-estadístico entre paréntesis.

^a Debido a que ese suprimió la constante de las ecuaciones, la R² no es relevante, pero se reporta la que arroja el programa E-views.

* Significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%.

Gráfico II-1
IMPACTOS DE CAMBIOS EN PRECIPITACIÓN Y EMISIONES DE CO₂
EN LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

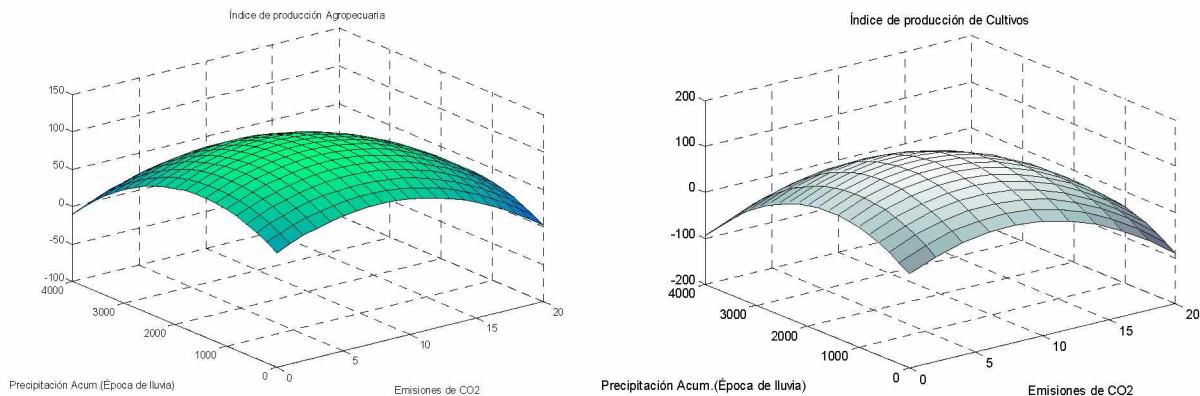
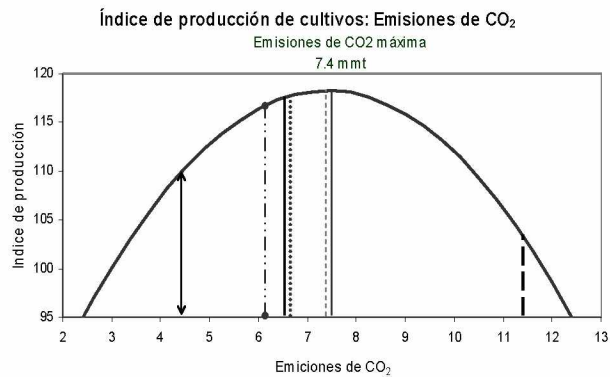
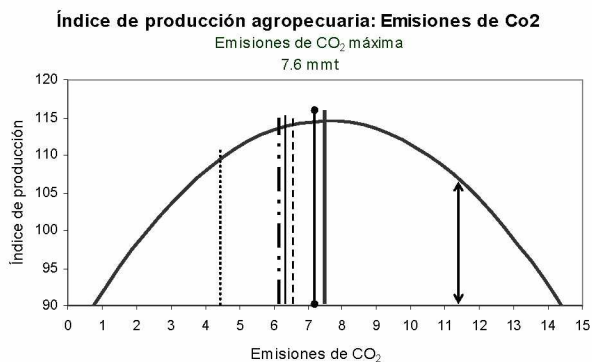


Gráfico II-2
NIVEL DE EMISIONES DE CO₂ 2005

Belice	0.8mmt	Costa Rica	6.4mmt	El Salvador	6.6mmt
Guatemala	11.4mmt	Honduras	7.4mmt	Nicaragua	4.4mmt
Panamá	6.1mmt				



Anexo III

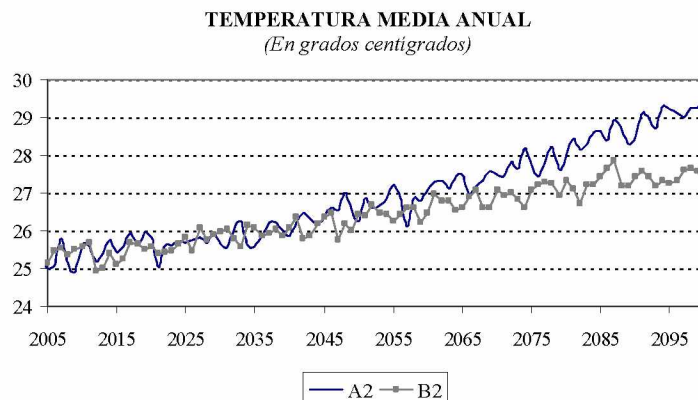
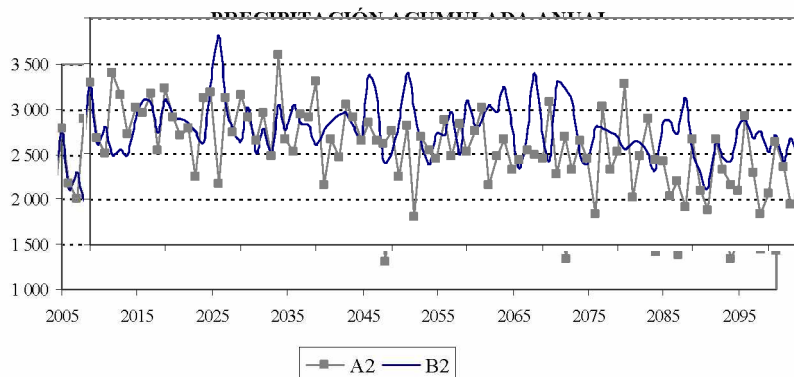
Cuadro III-1
ISTMO CENTROAMERICANO: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA, 2005-2100^a

	Observaciones	Media	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Precipitación acumulada anual (A2)	95	2 090,88	392,52	1 311,57	3 095,68
Precipitación acumulada anual (B2)	95	2 270,50	293,5	1 565,15	3 300,88
Temperatura media anual (A2)	95	26,93	1,25	24,88	29,47
Temperatura media anual (B2)	95	26,41	0,74	24,92	27,87

Fuente: Elaboración propia.

^a Promedio de la región.

Gráfico III-1
ISTMO CENTROAMERICANO: ESCENARIOS A2 PROMEDIO Y B2 PROMEDIO



Fuente: Elaboración propia.

Anexo IV

Cuadro IV-1
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO, 2020, 2030, 2050, 2070 Y 2100
ESCENARIO B2 (ECHAM, GFDL, HADGEM)
(En porcentajes del PIB de 2007)

Año	Producción agropecuaria				Producción agrícola				Producción de cereales			
	Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)			
	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08
Cambios en temperatura y precipitación												
2020	0,25	0,20	0,14	0,05	0,21	0,18	0,14	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
2030	2,19	1,70	1,22	0,62	1,62	1,28	0,94	0,51	0,22	0,17	0,13	0,07
2050	4,86	3,28	2,03	0,85	3,07	2,13	1,36	0,62	0,55	0,37	0,23	0,10
2070	9,20	5,19	2,68	0,93	5,33	3,11	1,70	0,67	1,07	0,60	0,31	0,11
2100	14,17	6,73	3,02	0,95	7,54	3,79	1,84	0,67	1,84	0,84	0,36	0,11
Cambios en temperatura												
2020	0,56	0,50	0,44	0,36	0,22	0,19	0,17	0,14	0,08	0,07	0,06	0,05
2030	1,28	1,04	0,80	0,52	0,50	0,40	0,31	0,20	0,18	0,14	0,11	0,07
2050	3,54	2,38	1,50	0,72	1,38	0,93	0,58	0,28	0,49	0,33	0,21	0,10
2070	7,09	3,96	2,05	0,80	2,78	1,55	0,80	0,31	0,97	0,55	0,28	0,11
2100	14,05	6,11	2,52	0,82	5,54	2,40	0,99	0,32	1,91	0,83	0,35	0,11
Cambios en precipitación												
2020	-0,31	-0,31	-0,31	-0,31	-0,01	-0,02	-0,03	-0,06	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
2030	0,91	0,66	0,42	0,10	1,12	0,87	0,62	0,31	0,04	0,03	0,02	0,00
2050	1,32	0,90	0,53	0,13	1,70	1,20	0,78	0,34	0,06	0,04	0,02	0,00
2070	2,12	1,23	0,63	0,14	2,55	1,56	0,90	0,36	0,10	0,06	0,03	0,00
2100	0,12	0,62	0,50	0,13	1,99	1,38	0,86	0,35	-0,07	0,00	0,01	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro IV-2
ISTMO CENTROAMERICANO: IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO, 2020, 2030, 2050, 2070 Y 2100
(En porcentajes del PIB de 2007)

Año	Cambios en temperatura							
	Producción pecuaria							
	Escenario A2				Escenario B2			
	Tasa de descuento (r)				Tasa de descuento (r)			
	0,005	0,02	0,04	0,08	0,005	0,02	0,04	0,08
2020	0,49	0,43	0,36	0,27	0,30	0,27	0,24	0,19
2030	0,88	0,72	0,56	0,36	0,70	0,57	0,44	0,28
2050	2,41	1,62	1,02	0,49	1,94	1,31	0,82	0,39
2070	5,07	2,80	1,43	0,54	3,88	2,17	1,12	0,43
2100	11,79	4,85	1,87	0,56	7,67	3,34	1,38	0,45

Fuente: Elaboración propia.