



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

Impactos, medidas de adaptación y costos sociales del cambio climático en el sector agrícola del Estado Plurinacional de Bolivia

La vinculación de políticas
microeconómicas y
macroeconómicas para un
desarrollo sostenible

Federico Ernesto Viscarra Riveros
Carlo Giupponi
Robert Mendelsohn



NACIONES UNIDAS

CEPAL



POR UN DESARROLLO
SOSTENIBLE CON IGUALDAD





Impactos, medidas de adaptación y costos sociales del cambio climático en el sector agrícola del Estado Plurinacional de Bolivia

La vinculación de políticas microeconómicas y macroeconómicas para un desarrollo sostenible

Federico Ernesto Viscarra Riveros
Carlo Giupponi
Robert Mendelsohn



Este documento fue preparado por Federico Ernesto Viscarra Riveros, Carlo Giupponi y Robert Mendelsohn, Consultores de la Unidad de Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa EUROCLIMA (CEC/14/001), y contó con el financiamiento de la Unión Europea.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Publicación de las Naciones Unidas

LC/TS.2018/20

Distribución: Limitada

Copyright © Naciones Unidas, marzo de 2018. Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Santiago

S.17-00655

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones@cepal.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

| | |
|--|----|
| Resumen | 5 |
| Introducción | 7 |
| I. Estado del arte | 9 |
| II. Métodos | 13 |
| III. Resultados | 15 |
| A. Impactos del cambio climático | 15 |
| B. Políticas microeconómicas (medidas de adaptación)..... | 17 |
| C. Medidas de adaptación y políticas macroeconómicas conjuntas para lograr un desarrollo sostenible | 21 |
| D. Costos sociales de conservación forestal | 27 |
| IV. Conclusiones..... | 29 |
| Bibliografía | 31 |

Cuadros

| | | |
|----------|--|----|
| Cuadro 1 | Impactos del cambio climático y rendimientos promedio para diferentes escenarios en Bolivia | 16 |
| Cuadro 2 | Cambios promedio en la productividad de los cultivos en Bolivia | 18 |
| Cuadro 3 | Costo social estimado de conservación de bosques para el corto y largo plazo en Bolivia | 28 |

Gráficos

| | | |
|-----------|---|----|
| Gráfico 1 | Impactos del cambio climático en el PIB, en la deforestación y en el ingreso per cápita para diferentes escenarios | 17 |
| Gráfico 2 | Medidas de adaptación e impactos en el PIB, en la deforestación y en el ingreso per cápita en el corto plazo (2020s) | 18 |
| Gráfico 3 | Medidas de adaptación e impactos en el PIB, en la deforestación y en el ingreso per cápita en el largo plazo (2070s) | 20 |

| | | |
|------------|---|----|
| Gráfico 4 | Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en el PIB, la deforestación y el ingreso per cápita en el corto plazo (2020s) | 22 |
| Gráfico 5 | Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en la movilidad de la actividad agrícola y en el ingreso per cápita para el corto plazo (2020s)..... | 23 |
| Gráfico 6 | Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en el PIB, la deforestación y el ingreso per cápita en el largo plazo (2070s) | 24 |
| Gráfico 7 | Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en la movilidad de la actividad agrícola y en el ingreso per cápita para el largo plazo (2070s)..... | 26 |
| Diagrama | | |
| Diagrama 1 | Esquema metodológico del modelaje | 13 |

Resumen

En los últimos años, la expansión de la frontera agrícola en Bolivia se ha incrementado considerablemente, con superficies deforestadas en todo el país cercanas a las 270.000 ha/año, de las cuales aproximadamente 200.000 son deforestadas en una sola región: el departamento de Santa Cruz. Uno de los motores de la expansión, ha sido la producción de soya en condiciones de secano, observándose rendimientos muy bajos (kg/ha) en comparación a los de países vecinos. Adicionalmente y debido al cambio climático, se esperan variaciones tanto en la temperatura como en la precipitación, lo que reducirá aún más los rendimientos. Dicha situación junto a una creciente demanda de alimentos (aumento en las tasas de crecimiento poblacional), producirá una mayor expansión de la frontera agrícola. Para reducir la tasa de deforestación, aumentar el bienestar de los agricultores y garantizar la seguridad alimentaria en el país, es necesario incorporar una agricultura más eficiente, que incluya medidas de adaptación a nivel microeconómico que permita aumentar el rendimiento de los cultivos, pero vinculada a políticas macroeconómicas de protección de los recursos naturales, a fin de alcanzar un desarrollo sostenible. Para cuantificar el impacto y eficacia de las políticas, se utilizan modelos de simulación matemática para los rendimientos de los cultivos (soya, maíz y arroz), vinculados al Modelo de Equilibrio General Computable (CGE, por sus siglas en inglés), dinámico recursivo. Por un lado, se evalúan cuatro medidas de adaptación microeconómicas que contrarrestan los impactos del cambio climático e incrementan los rendimientos de los cultivos: fertilización, irrigación, cambio en la fecha de siembra y mejora integral de la tecnología de producción (que aplica las tres medidas de manera conjunta).

Los resultados muestran que la mejora integral de la tecnología de producción es la medida de adaptación microeconómica más efectiva para incrementar el rendimiento de los cultivos, el Producto Interno Bruto (PIB) y el ingreso promedio de los hogares. Sin embargo, el incremento en el rendimiento de los cultivos viene acompañado del incentivo adverso de mayor demanda por tierra, dada la rentabilidad de los mismos. Para contrarrestarlo, de manera conjunta se aplican medidas macroeconómicas, es decir, la mejora integral de la tecnología de producción se aplica junto a las siguientes políticas macroeconómicas: impuesto a los bienes agrícolas, impuesto a la actividad agrícola y restricción en los precios de exportación, simulando un escenario de “Climate Policy Mainstreaming” y de desarrollo sostenible. En este sentido, la mejor política macroeconómica (en términos de desarrollo sostenible, es decir, mayor crecimiento del PIB acompañado de menores niveles de deforestación) es la restricción en los precios de exportación (que simula una restricción en la demanda internacional de bienes agrícolas o cuotas de exportación), la cual reduce la magnitud de la tasa de deforestación (demanda por tierra), proveniente de la política microeconómica, pero manteniendo los niveles de crecimiento del PIB.

A partir de los resultados de la aplicación de dichas políticas y después de identificar la mejor combinación de políticas, se estima el costo social de la protección de bosques por hectárea en el corto y largo plazo los cuales, son un buen punto de partida para los procesos de negociación en esquemas de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+) o el Pago por Servicios Ambientales (PES), en el contexto de los acuerdos globales de cambio climático.

Introducción

La expansión de la frontera agrícola en Bolivia se ha incrementado considerablemente, con tasas de deforestación observadas de alrededor de 270.000 ha/año en todo el país, de las cuales cerca de 200.000 han ocurrido en el departamento de Santa Cruz que, además de ser uno de los más grandes en Bolivia, posee la mayor cantidad de tierras aptas para la agricultura, gracias a su clima favorable y su situación geográfica, dentro de las tierras bajas de la Amazonia.

En efecto, la evolución observada de la agricultura se ha incrementado a una tasa promedio de 7,9%. En otras palabras, pasó de 0,48 millones de hectáreas en 1990 a 1,95 millones en 2009 (CAO, 2010). La producción agrícola del departamento, en términos de volumen, representa el 75% de la producción total en todo el país. Sus principales zonas de producción pueden clasificarse en: i) Zona integrada (que incluye a los municipios de: Warnes, Montero, Portachuelo, Mineros y Yapacaní); y ii) Zona de expansión (que incluye a los municipios de: Pailón, San Julián, Gutiérrez y Guarayos); mientras que los principales cultivos son: soya, caña de azúcar, maíz y arroz. Los productores varían de pequeña a gran escala, pero la mayoría son colonizadores que implementan el método ineficiente de “chaqueo” (“slash and burn”) en condiciones de secano, haciéndolos mucho más vulnerables a cambios en los patrones climáticos y obteniendo menores rendimientos por unidad de área. De hecho, los rendimientos promedio en el país son menores a los observados en Argentina y Brasil, quienes tienen una agricultura mejor planificada y tecnificada y además, cuentan con acceso a irrigación.

En años recientes, se observaron reducciones en los rendimientos de los cultivos aún mayores, debido a incrementos en la temperatura, sequías e inundaciones. En este sentido, el IPCC (2001) reporta: “con el cambio climático, se esperan incrementos en las temperaturas medias y extremas en muchas regiones del planeta”. Dichos cambios pueden afectar el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos, dado que la temperatura y el agua, son los principales determinantes de la demanda de evaporación y transpiración de las plantas, particularmente en regiones tropicales (Priestley and Taylor, 1972). Esta situación, junto al incremento de las tasas poblacionales nacionales y mundiales, aumenta la necesidad de contar con mayores superficies cultivadas para cubrir la demanda de alimentos en las siguientes décadas. Por su parte, el incremento de las superficies deforestadas, no pueden extenderse indefinidamente debido a la escasez de los bosques y a los servicios ambientales que proporcionan, sin los que la actividad agrícola no sería posible (ciclo hídrico, fijación de CO₂, protección contra vientos, entre otros).

A saber, existe un consenso global en la literatura concerniente a la relación de los cambios de uso de suelo localizados con los servicios ambientales, ciclo hídrico, albedo y viento, entre otros. De acuerdo a Turner (2003), la “ciencia de la sostenibilidad” surge para mantener el balance ecosistémico derivado del entendimiento de la relación entre las actividades humanas y el medio ambiente, con el objetivo de satisfacer las necesidades de la sociedad y al mismo tiempo, mantener los sistemas de soporte vital del planeta. Dichos

objetivos, requieren de un mayor diálogo entre la ciencia y el proceso de toma de decisiones. Es decir, cada ecosistema cuenta con sus propios recursos naturales, de acuerdo con sus características ecológicas y climáticas (bosque y recursos naturales, en general), pero también existen presiones sobre ellos, determinadas por el medio socio-económico (agricultura y ganadería, en general). En este sentido, la sostenibilidad solo es posible si el balance entre las características se encuentra en equilibrio. La habilidad para lograr el balance o no, depende de un manejo eficiente de los recursos naturales, políticas de planificación, así como del marco legal e institucional que se selecciona para su implementación.

Para contrarrestar los impactos del cambio climático, garantizar la seguridad alimentaria y mantener niveles de deforestación sostenibles en Bolivia, se deben aplicar medidas de adaptación a nivel microeconómico, capaces de incrementar la productividad y los rendimientos de los cultivos (fertilización, irrigación, cambio en la fecha de siembra, mejora integral en la tecnología de producción, entre otros), acompañadas de políticas de protección de los recursos naturales a nivel macroeconómico (impuesto a los bienes agrícolas y/o a las actividades agrícolas, precios de exportación, cuotas de exportación, manejo y monitoreo de áreas protegidas, entre otros) y así, reducir los incentivos adversos de la expansión agrícola, provenientes del incremento en la demanda por tierras con mayor rendimiento y rentabilidad.

En las últimas décadas, la demanda del sector agropecuario y ganadero por nuevas tierras, ha llevado a tasas de deforestación alarmantes, especialmente en Tierras de Producción Forestal Permanente (TPFPs), las cuales no son aptas para actividades agrícolas. Como resultado de este uso inapropiado de los recursos forestales, Bolivia está sufriendo enormes pérdidas económicas y una serie de impactos negativos tanto sociales y como ambientales, muchos de los cuales son irreversibles (Wachholtz et al., 2006). Históricamente, las fuerzas de mercado y las políticas gubernamentales han alentado la expansión agrícola para lograr un crecimiento económico en detrimento de las tierras forestales. Solamente a partir de la década de 1990, los gobiernos sucesivos han comenzado a promover políticas de desarrollo sostenible relacionadas al bosque y al manejo de recursos naturales (por ejemplo: la Ley INRA y la Ley Forestal). A pesar de los programas de asistencia política y multilateral diseñados para reducir las altas tasas de deforestación, el deterioro de la cobertura forestal continúa, por lo que se observa una necesidad urgente de desarrollar la investigación en este campo de acción.

Objetivos

El principal objetivo de este estudio es explorar, cuantificar y comparar los impactos del cambio climático en la economía boliviana, en el bienestar de los agricultores y en la demanda por tierra, en diferentes escenarios con y sin medidas de adaptación.

Como objetivos secundarios están: i) identificar, a nivel microeconómico, la medida de adaptación que muestre un mayor incremento en los rendimientos de los diferentes cultivos; ii) identificar la política macroeconómica que muestre un mayor crecimiento económico, acompañado de menores niveles de deforestación; iii) cuantificar un costo social de conservación de bosques por hectárea, a partir de los resultados de la aplicación de las políticas de adaptación.

I. Estado del arte

Se utilizan dos modelos: uno “bottom-up”, y otro “top-down”. El primero, proviene de una serie de modelos de cultivos CERES y CROPGRO incluidos en el software DSSAT para soya, maíz y arroz. Mientras que el del segundo tipo, es un modelo de equilibrio general computable, dinámico recursivo, desarrollado en primera instancia por Lofgren et al. (2002), para el International Food Policy Research Institute (IFPRI) el cual, es modificado, calibrado y validado para la economía boliviana.

Por un lado, se han desarrollado modelos de cultivos para explorar los impactos del cambio climático en la producción de alimentos a escalas global, nacional y regional para diferentes partes del planeta. Sin embargo, existen diversas fuentes de incertidumbre, incluyendo la concentración de posibles emisiones de Gases con Efecto Invernadero (GEI), así como diferencias entre los escenarios de cambio climático generados por diferentes Modelos de Circulación Global (GCMs). De la misma manera, existe incertidumbre respecto a la aplicación de modelos de cultivos específicos a nivel parcela, para estimar la producción en áreas más extensas, debido a los desfases de escala entre los modelos de cultivos a nivel parcela, las proyecciones de los GCMs, los resultados de los RCMs y la producción agrícola regional.

La mayoría de los modelos de cultivos, están diseñados para representar la producción a nivel parcela, como en las series de modelos CERES y CROPGRO, lo que introduce cierta dificultad en la proyección de los impactos del cambio climático a nivel regional, a no ser que se implementen algunos supuestos como en la mayoría de los estudios, para ampliar el alcance de los resultados. El enfoque convencional para estudios de cambio climático ha sido correr el modelo para diferentes sitios y luego ampliar la escala de los resultados a nivel regional; o modelar rendimientos regionales promedio, utilizando tipos de suelo, variedades de cultivo y prácticas de manejo, representativas y específicas para cada región de interés. Como Xiong et al. (2008) mencionan, todos los modelos de cultivos deben ser validados y calibrados en el ambiente de interés si se quieren obtener resultados robustos. La calibración implica la minimización del error entre los resultados del modelo y los datos de campo observados; y además, la determinación de los parámetros con un propósito en particular. En cambio, la validación evalúa la habilidad del modelo calibrado, de simular y replicar las características y resultados de una base de datos diferente a la de la etapa de calibración.

El impacto regional de estudios de cambio climático, el área geográfica y los datos observados limitados, confinan a que la calibración utilice resultados de rendimientos ya sea de estaciones agrícolas experimentales o de las variedades comúnmente sembradas en la región de interés. Muchas veces, la selección de los sitios puede ser un tanto arbitraria, y restringida a la disponibilidad de datos, más que por ser una representación verdadera de prácticas regionales o de heterogeneidad espacial. Para este estudio, todas las recomendaciones de calibración y validación de los modelos mencionados son tomadas en cuenta. Por lo tanto, se seleccionan las cinco zonas con mayor producción de soya, maíz y arroz en el departamento de Santa Cruz, utilizando las variedades y prácticas de manejo usadas en cada una de las regiones, para obtener resultados mucho más cercanos a la realidad.

Entre los estudios más importantes y difundidos, está el de IFPRI (2009), que utiliza la serie de modelos de cultivos CERES y CROPGRO a nivel continental. Posteriormente, cuantifica los impactos del cambio climático provenientes del escenario SRES A2 del IPCC (Nakicenovic et al., 2000), con y sin el efecto fertilización proveniente de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Los escenarios provienen de dos GCMs: por un lado, el modelo del National Center for Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos; y por otro, el modelo de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) de Australia. Dicho estudio, muestra los impactos climáticos esperados en los rendimientos de la soya, maíz y arroz, entre otros, a un nivel bastante agregado o regional (Latinoamérica). Otros estudios, como el realizado por Parry et al. (2004), utilizan la serie de los mismos modelos y cuantifican los impactos del cambio climático en la producción de cereales a nivel mundial (maíz, arroz, trigo y soya), con un nivel de desagregación más detallado que el estudio anterior (por país), pero obteniendo resultados promedio para todos los cereales.

Sin embargo, los resultados siguen siendo muy generales y agregados, por lo que aún se necesita una escala más detallada y desglosada dada la diversidad agroecológica de Bolivia (desde los Andes hasta la Amazonía). De igual forma, no existe evidencia substancial de los estudios realizados para testear medidas de adaptación utilizando este tipo de modelos. En este estudio, a diferencia de los anteriores, se realiza una calibración y validación mucho más detallada (para las cinco zonas de producción, y los tres cultivos principales). Adicionalmente, se utilizan los escenarios de cambio climático de un Modelo de Circulación Regional, desarrollado para las condiciones bolivianas (Seiler, 2009), otorgando resultados más cercanos a la realidad.

También se han desarrollado CGEs, para cuantificar el impacto económico del cambio climático en muchas partes del planeta. En décadas recientes, se han realizado varios intentos para extender dichos modelos e incluir temas relacionados con las actividades de cambio de uso de suelo. Los primeros esfuerzos, se concentran en aplicaciones forestales con consideraciones inter-temporales y diferenciaciones entre los tipos de usos de suelo, aunque en muchos casos los aspectos biofísicos del suelo están débilmente representados. Por esta razón, se han incorporado aspectos dirigidos a mejorar el tratamiento de la transición entre diferentes tipos de usos de suelo, particularmente entre cultivos, ganadería, y bosque (van der Werf and Peterson, 2007).

Entre los estudios más importantes y difundidos, se encuentra el de Burniaux y Lee (2003), quienes extienden el Modelo Estático Estándar (GTAP, por sus siglas en inglés), para evaluar la transición inter-sectorial de diferentes usos de suelo, y cuantificar las emisiones de metano, dióxido de carbono y dióxido de nitrógeno provenientes de dichos cambios. En este enfoque, los propietarios del recurso suelo o tierra (considerado como un factor homogéneo), asignan su uso a actividades que generan mayores retornos bajo la restricción de la Elasticidad Constante de Transformación (CET), la cual determina el grado de movilidad entre diferentes usos. Por otro lado, Abdullah (2006) e Ignaciuk (2006), plantean al suelo como un factor heterogéneo, lo que implica que ciertos tipos, no son aptos para un cierto grupo de cultivos y/o actividades. Abdullah desarrolla un modelo CGE estático para Filipinas, e incorpora al sector de bioenergía para estudiar el conflicto entre la producción de alimentos y de biocombustibles. El modelo de Ignaciuk, considera una cierta proporción de suelo contaminado por las actividades de minería e industria, el cual solo puede utilizarse para la producción de biocombustibles y no para actividades agrícolas. Otro intento similar, utilizando modelos CGE, es el modelo “Future Agricultural Resources Model” (FARM), desarrollado para analizar los impactos del cambio climático en el sistema agrícola mundial (Darwin et al., 1995), compuesto por un Sistema de Información Geográfica (GIS) y una extensión del Modelo GTAP original, donde el mundo se divide en 12 regiones homogéneas, con 6 tipos de suelo, diferenciados por la duración de los periodos de crecimiento. Un aspecto importante es que proporciona datos regionales de oferta de agua para diferentes sectores. Además, existe una versión dinámica llamada “Dynamic Future Agricultural Resources Model” (D-FARM), la cual considera la teoría de los derechos de propiedad e inversión, para crear un modelo dinámico recursivo basado en tasas de crecimiento estimadas del PIB, inversión doméstica, población y mano de obra (Ianchivichina et al., 2001). Finalmente, Lee et al. (2004), profundizan en el tema de la heterogeneidad de suelos, a través de la aplicación de un modelo GTAP global, basado en información integrada, que incluye datos de cobertura y uso de suelo, almacenamiento de carbono forestal y emisiones de gases con efecto invernadero. La calidad del suelo está

diferenciada en 18 Zonas Agro-Ecológicas (AEZ), donde se combinan seis periodos de crecimiento y tres zonas climáticas, dentro de las que existen características similares de suelo, pendiente y clima, las cuales afectan directamente en sus niveles de productividad. Adicionalmente, el suelo puede moverse entre sectores, siempre y cuando sea apropiado para el uso en cuestión, pero no así entre AEZs. Este modelo, sigue en construcción y desarrollo, en la búsqueda de un mejor realismo biofísico a la hora de utilizar modelos CGE, y para realizar un análisis adecuado de políticas agrícolas y de recursos naturales, especialmente vinculadas con estrategias de reducción de las emisiones globales de GEI (Hertel et al., 2006; Golub, Hertel y Sohngen, 2007).

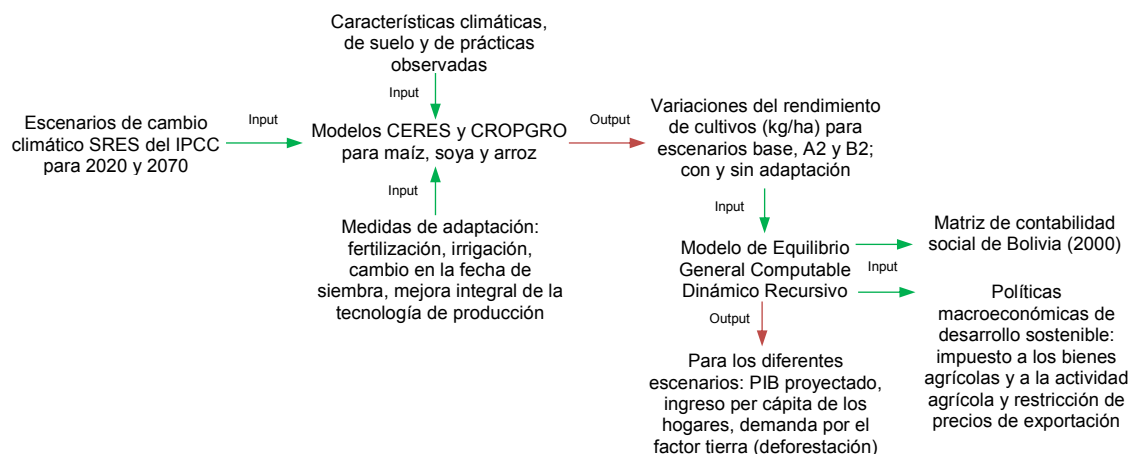
En este sentido, y debido a la carencia substancial de estudios concernientes a los impactos del cambio climático y desarrollo sostenible en la economía boliviana (especialmente enfocados en el sector de uso y cambio de uso de suelo), este estudio propone la utilización y vinculación de los resultados de los modelos de cultivos con un CGE recursivo dinámico, para cuantificar los shocks de diferentes escenarios de cambio climático y políticas de adaptación en los sectores agrícola y forestal, junto a sus efectos colaterales en la economía (en su conjunto).

II. Métodos

Se utilizan y vinculan dos tipos de modelaje: por un lado, los modelos de cultivos CERES y CROPGRO para maíz, arroz y soya, con el fin de cuantificar los impactos de diferentes escenarios de cambio climático y medidas de adaptación a nivel microeconómico en los rendimientos por hectárea de los cultivos; y por el otro, un CGE recursivo dinámico, basado en los modelos originales de Lofgren et al. (2002) y Thurlow (2004); el cual es modificado, calibrado y validado para la economía boliviana en el lenguaje de programación GAMS (The General Algebraic Modeling System), para evaluar los impactos del cambio climático con y sin medidas de adaptación tanto microeconómicas como macroeconómicas en la economía en general, y en el sector de uso y cambio de uso de suelo en particular. El diagrama 1, presenta un esquema metodológico de la investigación.

Como se observa, los modelos de cultivos CERES y CROPGRO son calibrados y validados con datos meteorológicos diarios observados (temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación solar), características físicas y químicas del suelo (textura, cantidad de materia orgánica, humedad, contenido de nutrientes, entre otros) y pruebas de campo en ambientes controlados realizados en las cinco zonas de producción más importantes del departamento de Santa Cruz (se registra: la variedad del cultivo; fecha de siembra, de floración y de madurez; peso y cantidad de los granos; aplicación de fertilizantes; entre otros). Una revisión detallada del proceso de calibración y validación de los modelos para las condiciones de Bolivia se encuentra en Viscarra (2010).

Diagrama 1
Esquema metodológico del modelaje



Fuente: Elaboración de los autores con base en la metodología empleada.

Después, se cuantifican los rendimientos promedio para el escenario base (clima observado) y para los diferentes escenarios de cambio climático SRES del IPCC (A2 y B2), de esta manera se cuantifican las variaciones de los rendimientos de los cultivos por hectárea. Posteriormente, en los modelos de cultivos se introducen algunas medidas de adaptación a nivel microeconómico, para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático. En paralelo, el modelo CGE es modificado, calibrado y validado para la economía boliviana, utilizando la Matriz de Contabilidad Social (SAM), del año 2000, de acuerdo con la disponibilidad de datos y para ser coherentes con la calibración y validación de los modelos.

Una vez que el Modelo CGE se valida, para el escenario base (2000 a 2010), las variaciones de los rendimientos de los cultivos provenientes de los escenarios de cambio climático A2 y B2, con y sin medidas de adaptación, son introducidos en el modelo CGE a través de la variación de las productividades de la actividad “agricultura tradicional” (para maíz y arroz) y la actividad “agricultura moderna” (para la soya). De esta manera, se cuantifica su efecto en el PIB, el ingreso de los hogares per cápita. También, se utiliza a la demanda por tierra de la actividad “agricultura moderna”, como proxy de la deforestación, dado que la soya se cultiva de manera extensiva y mecanizada, mientras que el maíz y el arroz se siembran a una menor escala por pequeños y medianos productores en Bolivia (CAO, 2010).

Finalmente, cuando la medida de adaptación más eficiente en términos de rendimiento por hectárea es identificada, se implementan junto a ésta una serie de medidas de adaptación a nivel macroeconómico en el modelo CGE, para alcanzar el desarrollo sostenible (el crecimiento económico y bienestar de la sociedad más alto de acuerdo el menor nivel de deforestación posible). Con estos resultados, se cuantifica un costo social de conservación de bosques por hectárea para el corto y largo plazo. La especificación matemática, programación y proceso de calibración y validación del modelo CGE dinámico recursivo para Bolivia, se puede encontrar en la tesis doctoral de Viscarra (2014).

III. Resultados

A continuación, se muestran los principales resultados de diferentes escenarios de cambio climático y de aplicación de medidas de adaptación. Los escenarios alternativos, constituyen diferentes shocks que hubieran impactado los resultados del escenario base validado (2000 a 2010). El modelo se resuelve para nuevos equilibrios y los cambios en los resultados de shocks simulados, son comparados con aquellos del escenario base (“Baseline”). Se analizan los siguiente grupos de shocks: i) Impactos del cambio climático provenientes de los diferentes escenarios SRES del IPCC que afectan los rendimientos de los cultivos, en el corto y largo plazo; ii) Políticas microeconómicas tomadas como medidas de adaptación para contrarrestar los impactos del cambio climático en los rendimientos de los cultivos y por ende en el sector agrícola; iii) Políticas macroeconómicas de protección de los recursos naturales para lograr un desarrollo sostenible en la economía boliviana (mayores niveles del PIB y del ingreso de los hogares per cápita, acompañados por niveles de deforestación menores y sostenibles en el tiempo), aplicadas conjuntamente con la medida de adaptación más efectiva en términos de crecimiento económico. Por último, con los resultados de los escenarios y políticas, se cuantifica un costo social de protección de bosques por hectárea para el corto y largo plazo.

A. Impactos del cambio climático

El cambio climático afectará a la agricultura y a los otros sectores de la economía de diferentes maneras a nivel mundial. Sin embargo, en este estudio, los impactos son introducidos solamente como cambios en la productividad de las actividades agrícolas de Bolivia. Por otra parte, se considera que los impactos del cambio climático en el resto del mundo se mantienen constantes, dado que Bolivia es un mercado pequeño en una economía mundial donde algunos países incrementarán sus productividades, mientras que otros las reducirán (Mendelsohn, et al., 2006) y teniendo en cuenta que el país siempre tiene más exportaciones que importaciones en actividades agrícolas, tal como se observa en su tendencia histórica. En esta sección, los escenarios de cambio climático SRES A2 y B2 del IPCC para el corto y largo plazo (2020s y 2070s, respectivamente), son introducidos en los modelos de cultivos CERES y CROPGRO. Los impactos en los rendimientos de la soya son introducidos en el modelo CGE como variaciones en la productividad de la actividad “agricultura moderna”; mientras que los impactos en los rendimientos del maíz y arroz promediados son introducidos en el modelo CGE como variaciones en la productividad de la actividad “agricultura tradicional”. Por un lado, el escenario A2, representa una situación “Business as Usual” o pesimista con altas emisiones de CO₂; mientras que, por el otro, el escenario B2 representa una “economía más limpia” u optimista con menores emisiones de CO₂. Una explicación más detallada de las características de los escenarios mencionados se encuentra en Nakicenovic et al. (2000). Se consideran ambos escenarios, para reducir la incertidumbre de los posibles impactos del cambio climático en el corto y largo plazo. El resumen los impactos y rendimientos esperados se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1
Impactos del cambio climático y rendimientos promedio para diferentes escenarios en Bolivia
(En kilogramos/hectárea)

| Indicador climático | Baseline | A2 20s | A2 70s | B2 20s | B2 70s | | | |
|---------------------|--------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|----------------------------------|
| <i>Mineros</i> | Temperatura máxima | 30,96 | -0,28 | 3,78 | -0,38 | 2,25 | Rendimiento promedio de soya en Bolivia (agricultura moderna) | |
| | Temperatura mínima | 18,42 | 3,78 | 7,38 | 3,63 | 6,06 | | |
| | Precipitación | 1 419,30 | <i>0,51</i> | <i>0,74</i> | <i>0,49</i> | -0,08 | | Escenario Rend (kg/ha) Variación |
| | Radiación solar | 16,67 | <i>0,63</i> | <i>0,65</i> | <i>0,77</i> | <i>0,77</i> | | Baseline 3 108,11 % |
| <i>Pailon</i> | Temperatura máxima | 32,14 | -1,62 | 2,51 | -1,68 | 0,85 | A220 2 953,66 -5 | |
| | Temperatura mínima | 19,23 | 2,87 | 6,57 | 2,72 | 5,08 | A270 3 141,23 <i>1</i> | |
| | Precipitación | 1 063,60 | <i>0,35</i> | <i>0,67</i> | <i>0,42</i> | -0,05 | B220 2 982,43 -4 | |
| | Radiación solar | 16,63 | <i>0,51</i> | <i>0,83</i> | <i>0,60</i> | <i>0,75</i> | B270 2 951,14 -5 | |
| <i>San Julian</i> | Temperatura máxima | 31,78 | -0,64 | 3,56 | -0,80 | 1,93 | Rendimiento promedio de maíz y arroz en Bolivia (agricultura tradicional) | |
| | Temperatura mínima | 22,53 | -0,17 | 3,43 | -0,33 | 2,08 | | |
| | Precipitación | 1 280,90 | -0,02 | <i>0,10</i> | -0,02 | -0,06 | | Escenario Rend (kg/ha) Variación |
| | Radiación solar | 16,91 | <i>1,14</i> | <i>1,36</i> | <i>1,23</i> | <i>0,65</i> | | Baseline 4 194,39 % |
| <i>Yapacani</i> | Temperatura máxima | 29,52 | <i>1,08</i> | 5,13 | 0,97 | 3,60 | A220 3 708,59 -12 | |
| | Temperatura mínima | 19,45 | 2,73 | 6,38 | 2,57 | 5,05 | A270 2 216,20 -47 | |
| | Precipitación | 1 707,70 | <i>0,01</i> | <i>0,16</i> | -0,04 | -0,10 | B220 3 706,10 -12 | |
| | Radiación solar | 16,87 | -0,53 | -0,83 | -0,36 | -0,61 | B270 2 698,13 -36 | |
| <i>Guarayos</i> | Temperatura máxima | 30,53 | <i>0,63</i> | 4,29 | 0,47 | 2,98 | | |
| | Temperatura mínima | 19,63 | 3,07 | 5,35 | 2,92 | 4,47 | | |
| | Precipitación | 1 370,80 | <i>0,45</i> | <i>0,22</i> | <i>0,40</i> | -0,05 | | |
| | Radiación solar | 16,98 | -0,08 | -0,05 | <i>0,06</i> | -1,11 | | |

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados de los modelos CERES y CROPGRO.

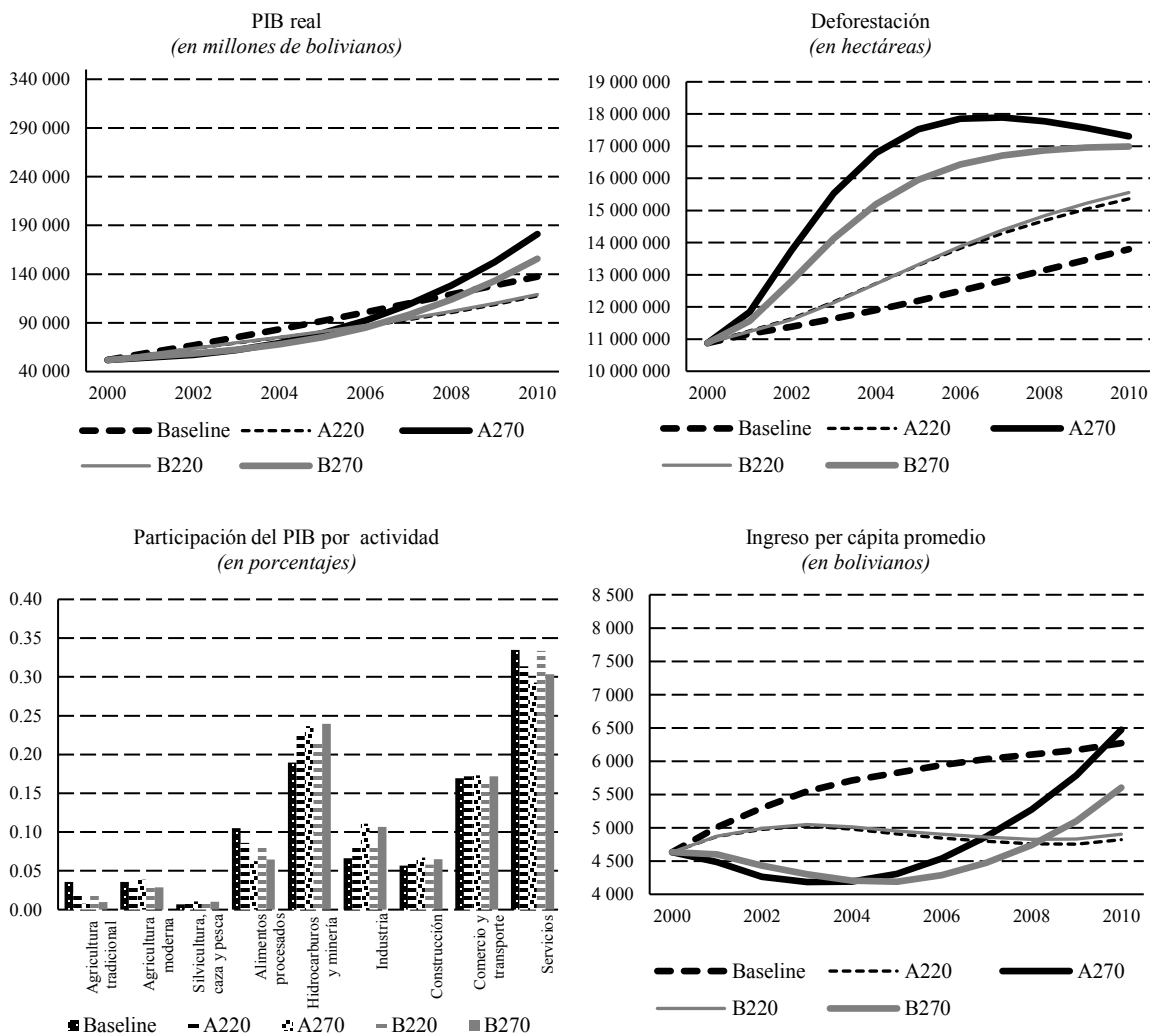
Los números en cursiva representan incrementos y los números en negritas son reducciones. Como se observa, con cambio climático se esperan mayores temperaturas en diferentes magnitudes, dependiendo de la locación; mientras que, para las precipitaciones, se esperan incrementos en el corto plazo (2020s) para ambos escenarios y en el largo plazo (2070s), se esperan aumentos para el escenario A2 y reducciones para el escenario B2. En el cuadro de la derecha, se aprecian los resultados de los rendimientos de los diferentes cultivos, los cuales provienen del promedio de resultados de las cinco zonas de producción. Para la soya, se esperan reducciones de -4 a -5%. El único escenario que muestra incrementos es el A270s (+1%). Para el caso del maíz y el arroz, en todos los escenarios se observan reducciones en el rango de -12 a -47%, en el corto y largo plazo, respectivamente. Los cambios en los rendimientos se introducen como variaciones en la productividad para las actividades “agricultura moderna” y “agricultura tradicional”, respectivamente. El efecto de las medidas de adaptación es introducido de la misma manera. El resumen de los resultados se presenta en el gráfico 1: la línea segmentada es el escenario base (“baseline”, 2000 a 2010), gruesa oscura representa los impactos del cambio climático en el corto plazo, y la gruesa clara los impactos en el largo plazo.

Impactos en el corto plazo (2020s): con cambio climático, se espera que el PIB decrezca cerca del -10% en promedio. También se observa una reducción en la participación de la agricultura moderna y tradicional en el PIB, estos factores se mueven a actividades mineras, de hidrocarburos e industriales. Por otra parte, con menores rendimientos por hectárea, la demanda por el factor tierra (deforestación) incrementa en el rango de +7 a +8% en promedio (alrededor de 85,000 ha/año adicional). Finalmente, el ingreso promedio per cápita también se ve reducido en el orden de -14% en promedio.

Impactos en el largo plazo (2070s): el PIB es menor en las primeras etapas e incrementa en las últimas, aunque en promedio, se observa una reducción en el rango de -2 a -8% para todo el periodo, dependiendo del escenario. Dicha reducción respecto al corto plazo se explica por la mayor participación de la agricultura moderna en el escenario A270 (proveniente de un incremento de +1% en su productividad), también se aprecia una mayor participación en las actividades mineras, de hidrocarburos e industriales. Por su parte, la demanda de tierra es mayor, y se encuentra en el rango de +21 a +29% (alrededor de 240.000 a 320.000 ha adicionales de deforestación por año). Finalmente, el ingreso per cápita, se reduce en promedio -

15 a -19%, para todo el periodo, con grandes reducciones en los primeros periodos y algunos incrementos en los finales, derivado de la migración de los factores de producción.

Gráfico 1
Impactos del cambio climático en el PIB, en la deforestación y en el ingreso per cápita para diferentes escenarios



Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

B. Políticas microeconómicas (medidas de adaptación)

Para contrarrestar los efectos adversos del cambio climático en los rendimientos de los cultivos, se aplican algunas medidas de adaptación a nivel microeconómico: 1) Fertilización (elimina el estrés de los cultivos por micro y macro nutrientes); 2) Irrigación (elimina el estrés hídrico); 3) Cambio en la fecha de siembra (identifica la fecha de siembra que otorga mayores rendimientos); 4) Mejora integral en la tecnología de producción (aplica de manera simultánea a las tres medidas de adaptación). Todas se aplican para las 5 zonas de producción en el departamento de Santa Cruz, después los promedios son introducidos en el modelo CGE. De la misma forma, los resultados promedio de la soya, se introducen en la actividad de agricultura moderna, y los resultados promedio del maíz y el arroz, en la actividad de agricultura tradicional. Cabe mencionar que los costos de adaptación pueden resultar elevados, especialmente para inversiones en

irrigación. Sin embargo, en este estudio, los costos de adaptación se consideran nulos, dado que, en la actualidad, el país cuenta con una diversidad de proyectos y financiamiento para programas de adaptación, provenientes de la cooperación internacional y del gobierno central.

Cuadro 2
Cambios promedio en la productividad de los cultivos en Bolivia

| Rendimientos promedio de la soya (agricultura moderna) | | | | | | | | | | |
|--|----------------|-----------|---------------|-----------|------------|-----------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
| | Sin adaptación | | Fertilización | | Irrigación | | Fecha de siembra | | Mejora integral | |
| Baseline | 3 108 | % | 3 108 | % | 3 108 | % | 3 108 | % | 3 108 | % |
| A220 | 2 954 | -5 | 2 962 | -5 | 2 954 | -5 | 3 650 | <i>17</i> | 4 198 | <i>35</i> |
| A270 | 3 141 | <i>1</i> | 3 152 | <i>1</i> | 3 457 | <i>11</i> | 3 419 | <i>10</i> | 3 894 | <i>25</i> |
| B220 | 2 982 | -4 | 2 969 | -4 | 2 980 | -4 | 3 354 | <i>8</i> | 3 826 | <i>23</i> |
| B270 | 2 951 | -5 | 2 952 | -5 | 3 124 | <i>1</i> | 2 967 | -5 | 3 471 | <i>12</i> |

| Rendimientos promedio del maíz y arroz (agricultura tradicional) | | | | | | | | | | |
|--|----------------|------------|---------------|------------|------------|------------|------------------|------------|-----------------|-----------|
| | Sin adaptación | | Fertilización | | Irrigación | | Fecha de siembra | | Mejora integral | |
| Baseline | 4 194 | % | 4 194 | % | 4 194 | % | 4 194 | % | 4 194 | % |
| A220 | 3 709 | -12 | 4 382 | <i>4</i> | 4 391 | <i>5</i> | 4 408 | <i>5</i> | 5 332 | <i>27</i> |
| A270 | 2 216 | -47 | 2 438 | -42 | 2 454 | -41 | 3 120 | -26 | 3 820 | -9 |
| B220 | 3 706 | -12 | 4 493 | <i>7</i> | 4 490 | <i>7</i> | 4 449 | <i>6</i> | 5 628 | <i>34</i> |
| B270 | 2 698 | -36 | 3 077 | -27 | 3 070 | -27 | 3 328 | -21 | 4 263 | <i>2</i> |

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados de los modelos CERES y CROPGRO.

Como se puede apreciar en el cuadro 2, los números en negrita representan reducciones en la productividad de la agricultura moderna y tradicional, mientras que los números en cursiva representan incrementos. Estos resultados, son introducidos en el Modelo CGE para cuantificar los impactos en el PIB, en el nivel de deforestación y en el ingreso per cápita.

Las variaciones mostradas en el gráfico 3, son cambios promedio con respecto al escenario base (“baseline”, sin medidas de adaptación). En el corto plazo, la medida de adaptación más efectiva en términos de crecimiento económico es la “mejora integral en la tecnología de producción”, con incrementos del PIB en el rango de +56 a +70% en promedio, para los escenarios A220s y B220s, respectivamente. Sin embargo, trae consigo, un incremento del nivel de deforestación en el orden de +26 a +34% con respecto al “baseline”, lo que representan alrededor de 2 millones de hectáreas deforestadas adicionales por año. La segunda medida más efectiva, es el cambio en la fecha de siembra, mostrando incrementos del PIB de +12 a +16% en promedio, al mismo tiempo se observa una reducción en el nivel de deforestación (de -4 a -7%). Por su parte, los incrementos en el ingreso per cápita promedio son similares a los del PIB. Y aunque las otras medidas de adaptación también son efectivas, los incrementos en el PIB e ingreso per cápita, mucho menores.

Gráfico 2
Medidas de adaptación e impactos en el PIB, en la deforestación y en el ingreso per cápita en el corto plazo (2020s)

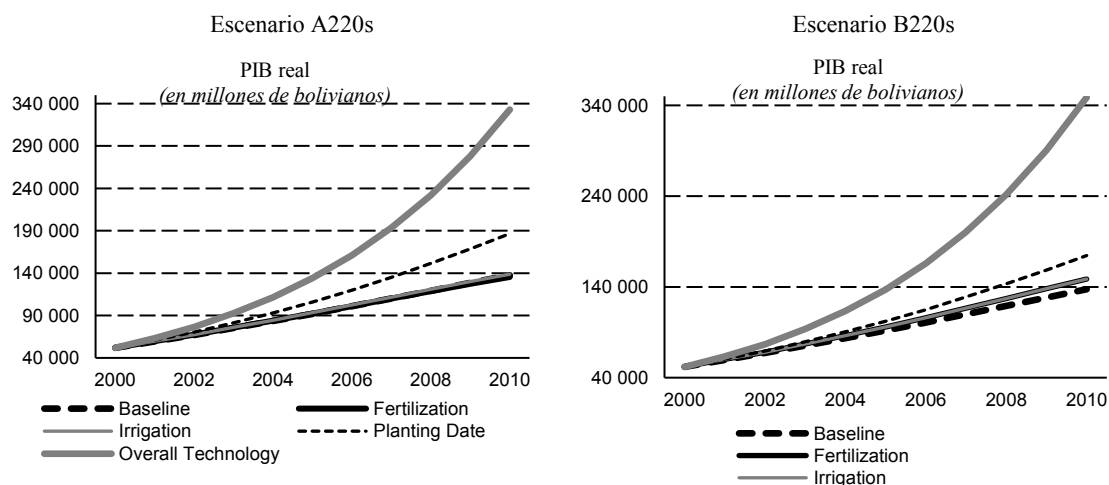
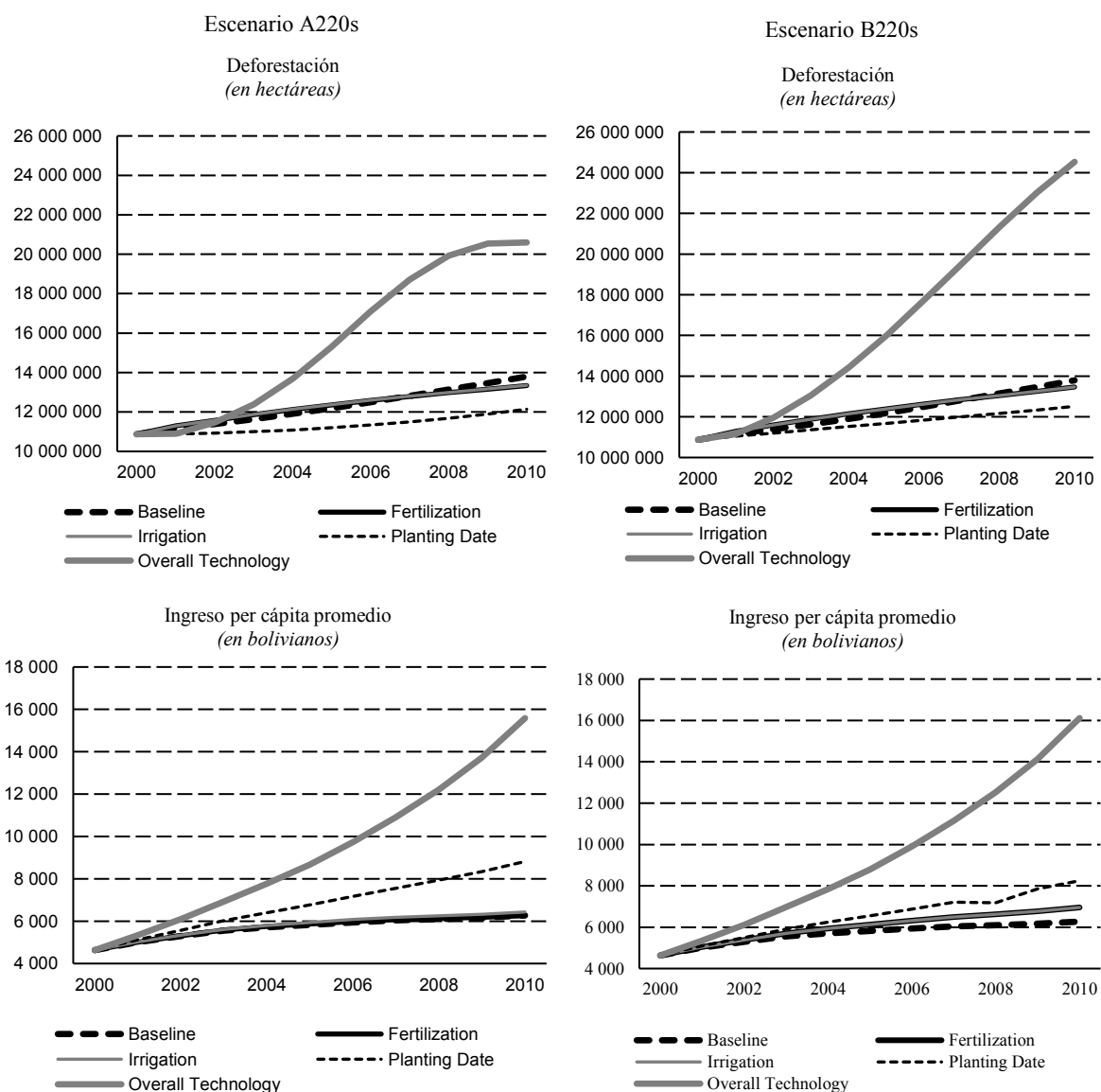


Gráfico 2 (conclusión)



| Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) | | | | Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) | | | |
|--|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Escenario A220s | | | Escenario B220s | | | | |
| Escenario A220 | PIB (porcentajes) | Deforestación (porcentajes) | Ingreso per cápita (porcentajes) | Escenario B220 | PIB (porcentajes) | Deforestación (porcentajes) | Ingreso per cápita (porcentajes) |
| Sin medidas | -10 | 7 | -14 | Sin medidas | -10 | 8 | -13 |
| Fertilización | 0 | 0 | 0 | Fertilización | 4 | 0 | 5 |
| Irrigación | 1 | 0 | 2 | Irrigación | 4 | 0 | 5 |
| Fecha de siembra | 16 | -7 | 18 | Fecha de siembra | 12 | -4 | 13 |
| Mejora integral | 56 | 26 | 59 | Mejora integral | 60 | 34 | 62 |

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

Gráfico 3
Medidas de adaptación e impactos en el PIB, en la deforestación
y en el ingreso per cápita en el largo plazo (2070s)

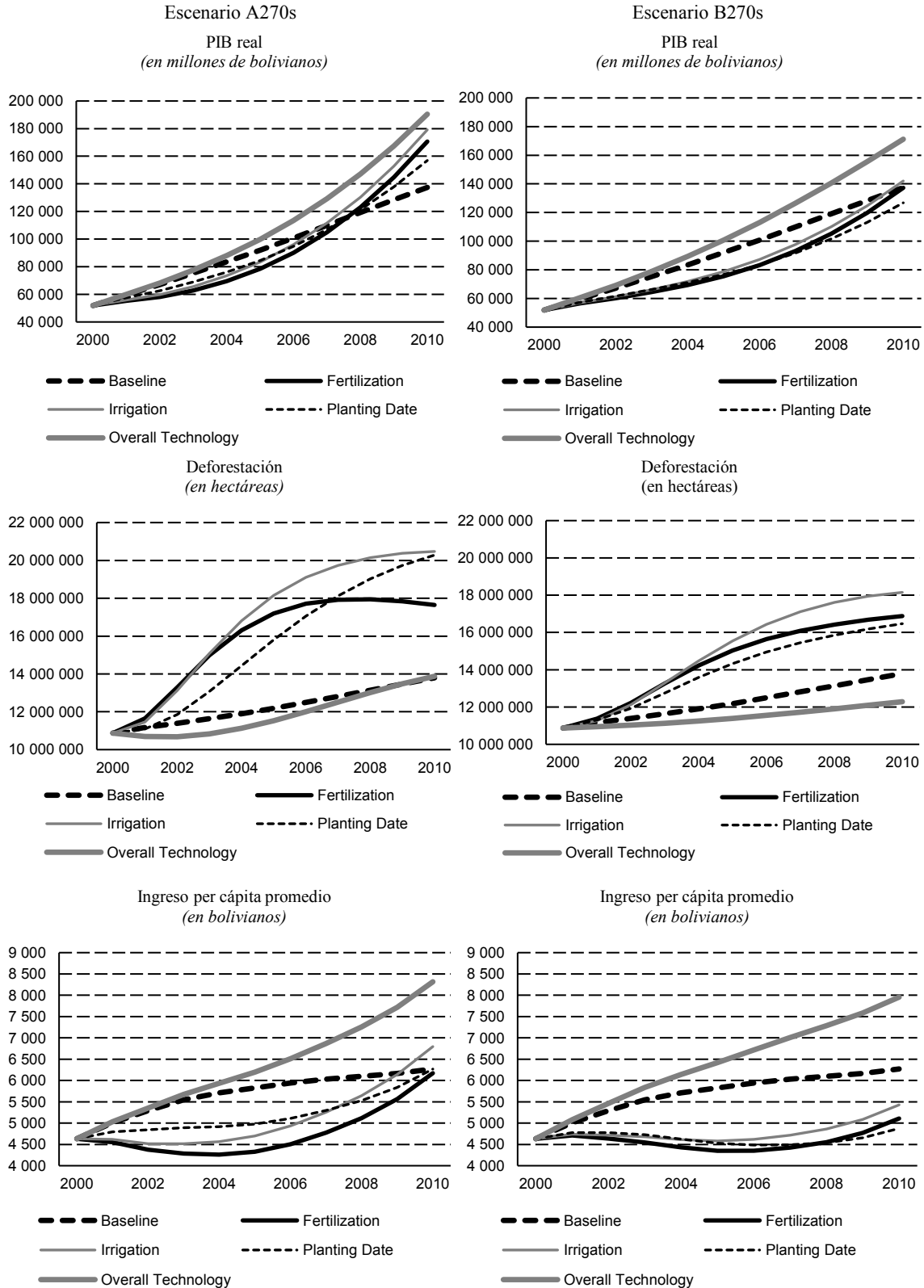


Gráfico 3 (conclusión)

| Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) Escenario A270s | | | | Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) Escenario B270s | | | |
|---|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Escenario A270 | PIB (porcentajes) | Deforestación (porcentajes) | Ingreso per cápita (porcentajes) | Escenario B270 | PIB (porcentajes) | Deforestación (porcentajes) | Ingreso per cápita (porcentajes) |
| Sin medidas | -2 | 7 | -15 | Sin medidas | -8 | 21 | -19 |
| Fertilización | -4 | 28 | -16 | Fertilización | -11 | 17 | -19 |
| Irrigación | 0 | 36 | -10 | Irrigación | -8 | 21 | -15 |
| Fecha de siembra | -2 | 26 | -9 | Fecha de siembra | -11 | 13 | -18 |
| Mejora integral | 13 | -3 | 10 | Mejora integral | 11 | -6 | 11 |

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

En el largo plazo, la única medida de adaptación efectiva para incrementar el PIB y el ingreso per cápita, es la “mejora integral en la tecnología de producción”, con incrementos del PIB en el rango de +11 a +13%, y del ingreso per cápita en +10% en promedio. Esta medida de adaptación también muestra reducciones en el nivel de deforestación (de -3 a -6%), lo que representa alrededor de 10.000 ha adicionales conservadas por año, en promedio. Las demás medidas no tienen el efecto esperado, dado que los impactos del cambio climático en el largo plazo son mucho más fuertes e intensos.

C. Medidas de adaptación y políticas macroeconómicas conjuntas para lograr un desarrollo sostenible

En esta sección, la medida de adaptación más efectiva es combinada con 3 políticas macroeconómicas a fin de lograr un desarrollo sostenible, es decir, mayor crecimiento del PIB y del ingreso per cápita, acompañado de un nivel de deforestación menor y más estable en el tiempo. La medida más efectiva fue la “mejora integral en la tecnología de producción”, la cual contrarresta los impactos del cambio climático y muestra un mayor crecimiento del PIB y del ingreso per cápita; lastimosamente este crecimiento, está acompañado de una mayor demanda por el recurso tierra (deforestación), por lo que se combinada con las siguientes políticas macroeconómicas de protección de los recursos naturales enfocadas a disminuir el nivel de deforestación: 1) Incremento del 30% en los impuestos de los bienes producidos por la agricultura moderna; 2) Incremento del 30% en los impuestos de la actividad de agricultura moderna; 3) Reducción del 30% en el precio de exportación de los bienes producidos por la actividad de agricultura moderna (simula un escenario de reducción en las cuotas de exportación).

Se elige una proporción del 30% para todas las políticas macroeconómicas, dado que, en el corto plazo, los rendimientos más altos provenientes de la agricultura (debido a la aplicación de la mejora integral de la tecnología de producción), pero que dan lugar al incentivo adverso de aumentar la demanda de tierra para la actividad de agricultura moderna (como variable proxy de la deforestación), en el rango de +26 a +34% (+30% en promedio). El impuesto a los bienes producidos en la agricultura moderna para el escenario base, es de 3%; mientras que, con el impuesto a la actividad de agricultura moderna, es de 0,03%; y por último, el precio de exportación de los bienes producidos en la actividad de agricultura moderna, es determinado como la demanda de estos bienes por parte del resto del mundo; por lo que, con esta política se restringe la demanda internacional de bienes en -30%. En el gráfico 4 se muestran los resultados de los experimentos.

Gráfico 4

Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en el PIB, la deforestación y el ingreso per cápita en el corto plazo (2020s)

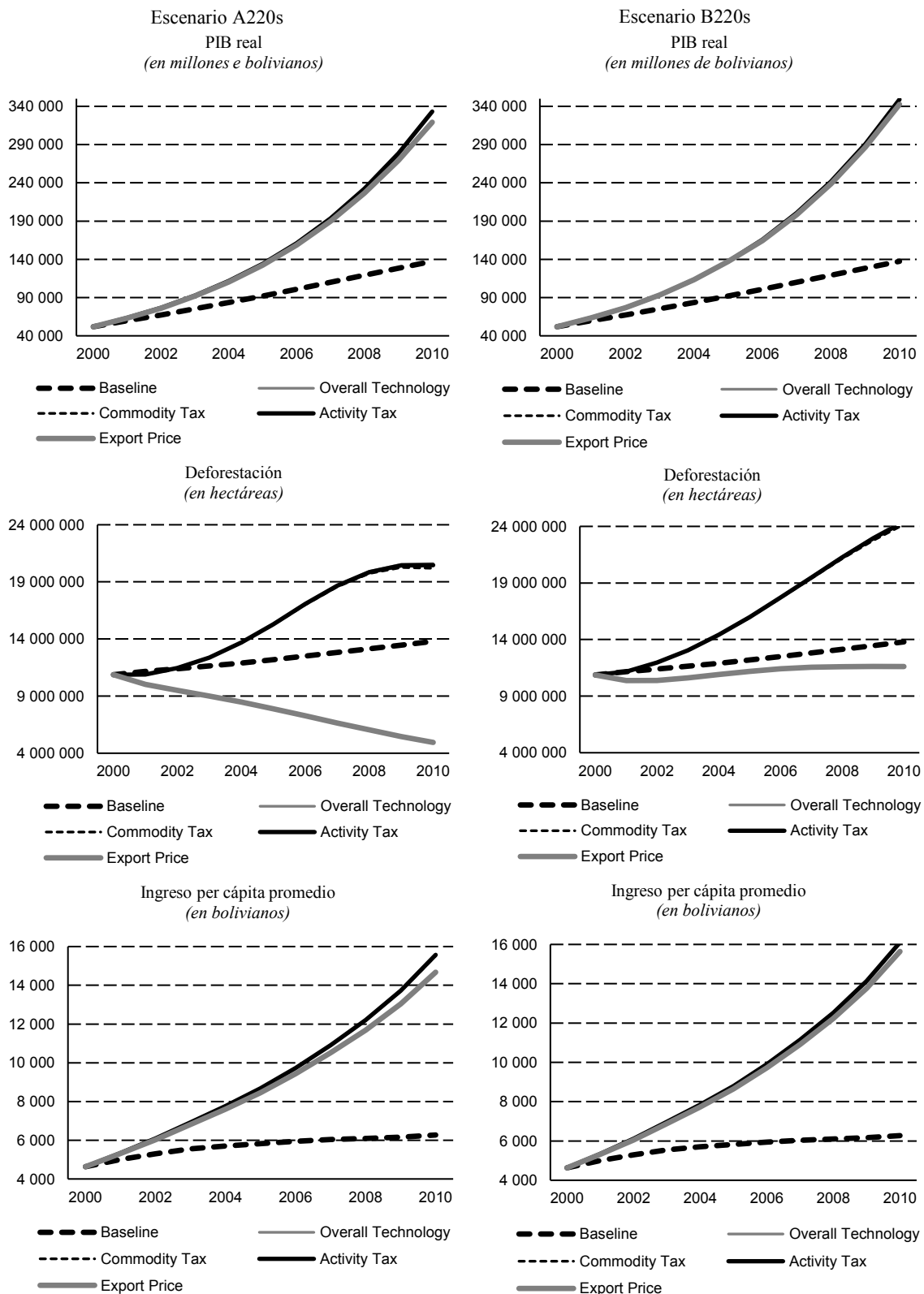


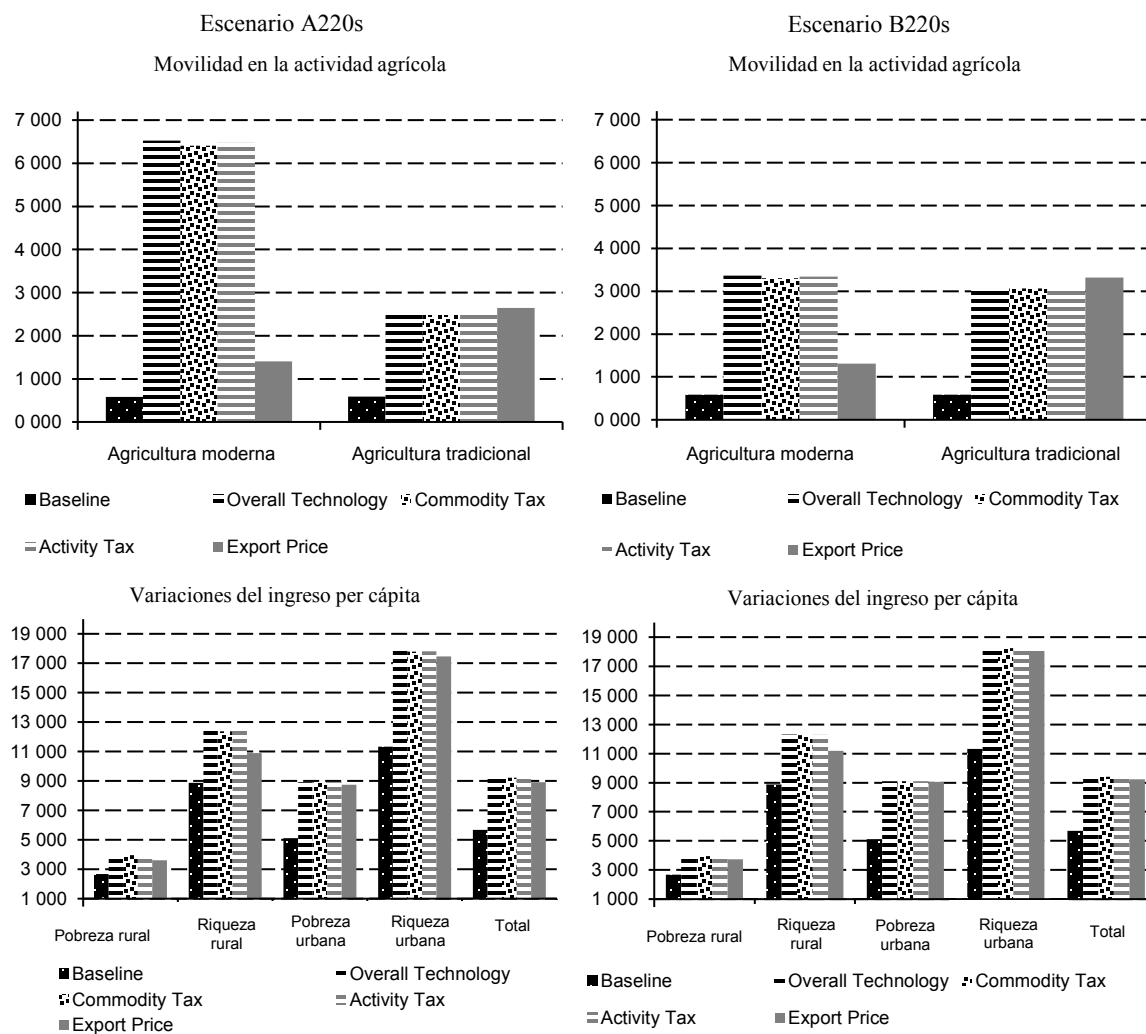
Gráfico 4 (conclusión)

| Escenario A220 | Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) Escenario A220s | | | Escenario B220 | Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) Escenario B220s | | |
|---|---|-----------------------------|----------------------------------|---|---|-----------------------------|----------------------------------|
| | PIB (porcentajes) | Deforestación (porcentajes) | Ingreso per cápita (porcentajes) | | PIB (porcentajes) | Deforestación (porcentajes) | Ingreso per cápita (porcentajes) |
| Impactos CC sin medidas | -10 | 7 | -14 | Impactos CC sin medidas | -10 | 8 | -13 |
| Mejora integral independiente | 56 | 26 | 59 | Mejora integral independiente | 60 | 34 | 62 |
| Mejora integral con impuesto bienes | 56 | 25 | 59 | Mejora integral con impuesto bienes | 60 | 33 | 62 |
| Mejora integral con impuesto actividad | 56 | 25 | 59 | Mejora integral con impuesto actividad | 60 | 34 | 62 |
| Mejora integral con precio de exportación | 53 | -35 | 54 | Mejora integral con precio de exportación | 59 | -9 | 59 |

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

Gráfico 5

Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en la movilidad de la actividad agrícola y en el ingreso per cápita para el corto plazo (2020s)



Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

El gráfico 6, muestra la movilidad entre actividades, así como los efectos distributivos de las políticas aplicadas. En el corto plazo, el impuesto en los bienes producidos por la agricultura moderna parece ser más eficiente que el impuesto directo en la agricultura moderna, en términos de su reducción respecto a la medida de adaptación de “mejora integral en la tecnología de producción” aplicada de manera individual. Ambos impuestos, reducen el ingreso de los hogares rurales ricos que son los más afectados. Por otra parte, al aplicar la reducción de los precios de exportación de los bienes de la actividad de agricultura moderna, se reduce dicha actividad más que en el caso de ambos impuestos, y también se observa una movilidad hacia la actividad de agricultura tradicional; mientras que la mayor reducción de los ingresos per cápita, se observa en los hogares y compañías rurales ricas.

Gráfico 6
Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto:
impactos en el PIB, la deforestación y el ingreso per cápita en el largo plazo (2070s)

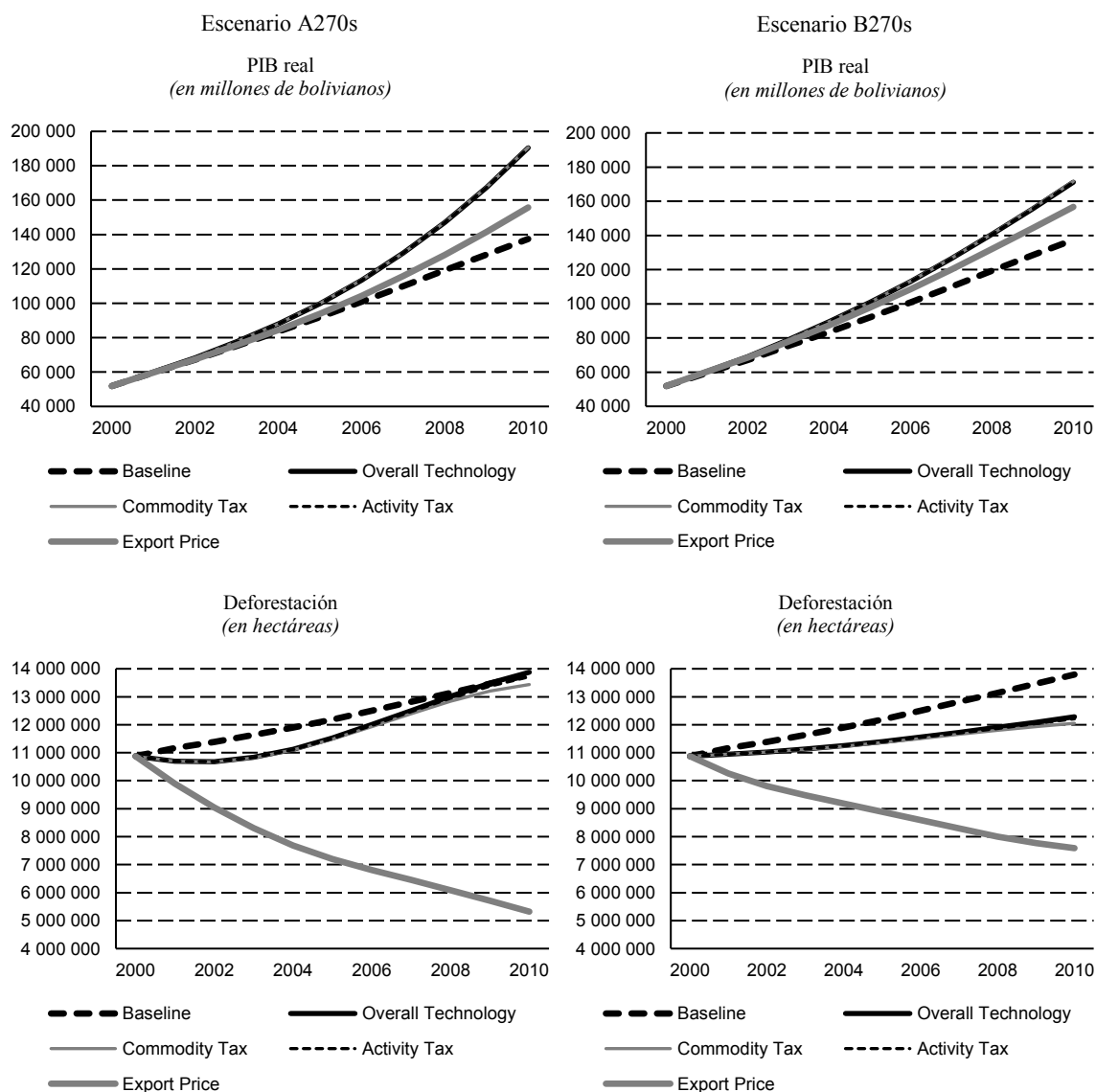
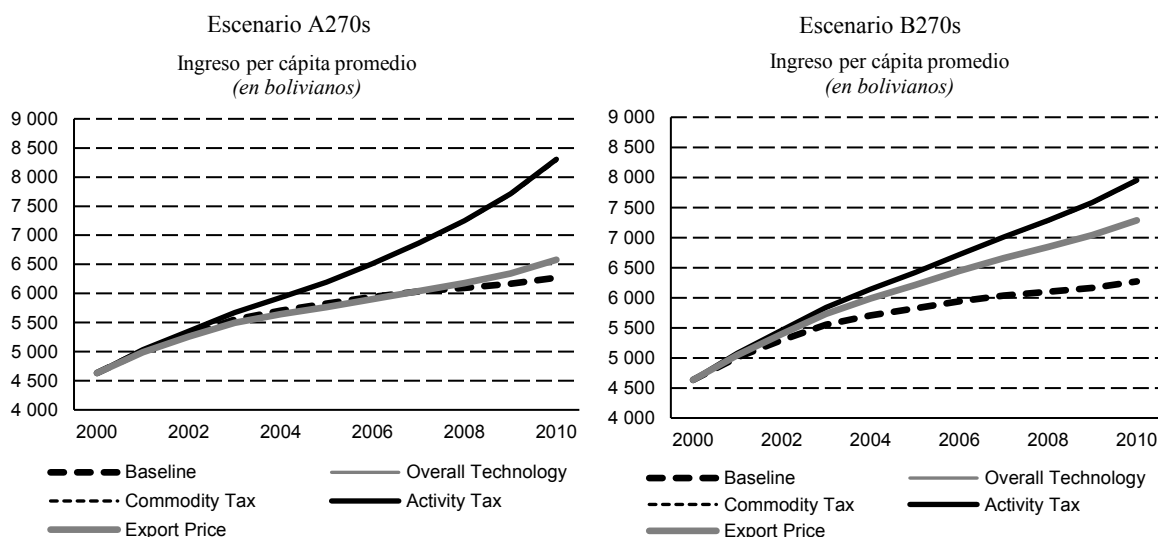


Gráfico 6 (conclusión)



| Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) Escenario A270s | | | | Impactos promedio para todo el periodo (2000-2010) Escenario B270s | | | |
|---|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Escenario A270 | PIB en porcentajes | Deforestación en porcentajes | Ingreso per cápita en porcentajes | Escenario B270 | PIB en porcentajes | Deforestación en porcentajes | Ingreso per cápita en porcentajes |
| Impactos cambio climático sin medidas | -2 | 7 | -15 | Impactos cambio climático sin medidas | -8 | 21 | -19 |
| Mejora integral independiente | 13 | -3 | 10 | Mejora integral independiente | 11 | -6 | 11 |
| Mejora integral con impuesto bs | 13 | -4 | 10 | Mejora integral con impuesto bs | 11 | -7 | 11 |
| Mejora integral con impuesto actividad | 13 | -4 | 10 | Mejora integral con impuesto actividad | 11 | -6 | 11 |
| Mejora integral con precio de exportación | 4 | -37 | 0 | Mejora integral con precio de exportación | 6 | -26 | 7 |

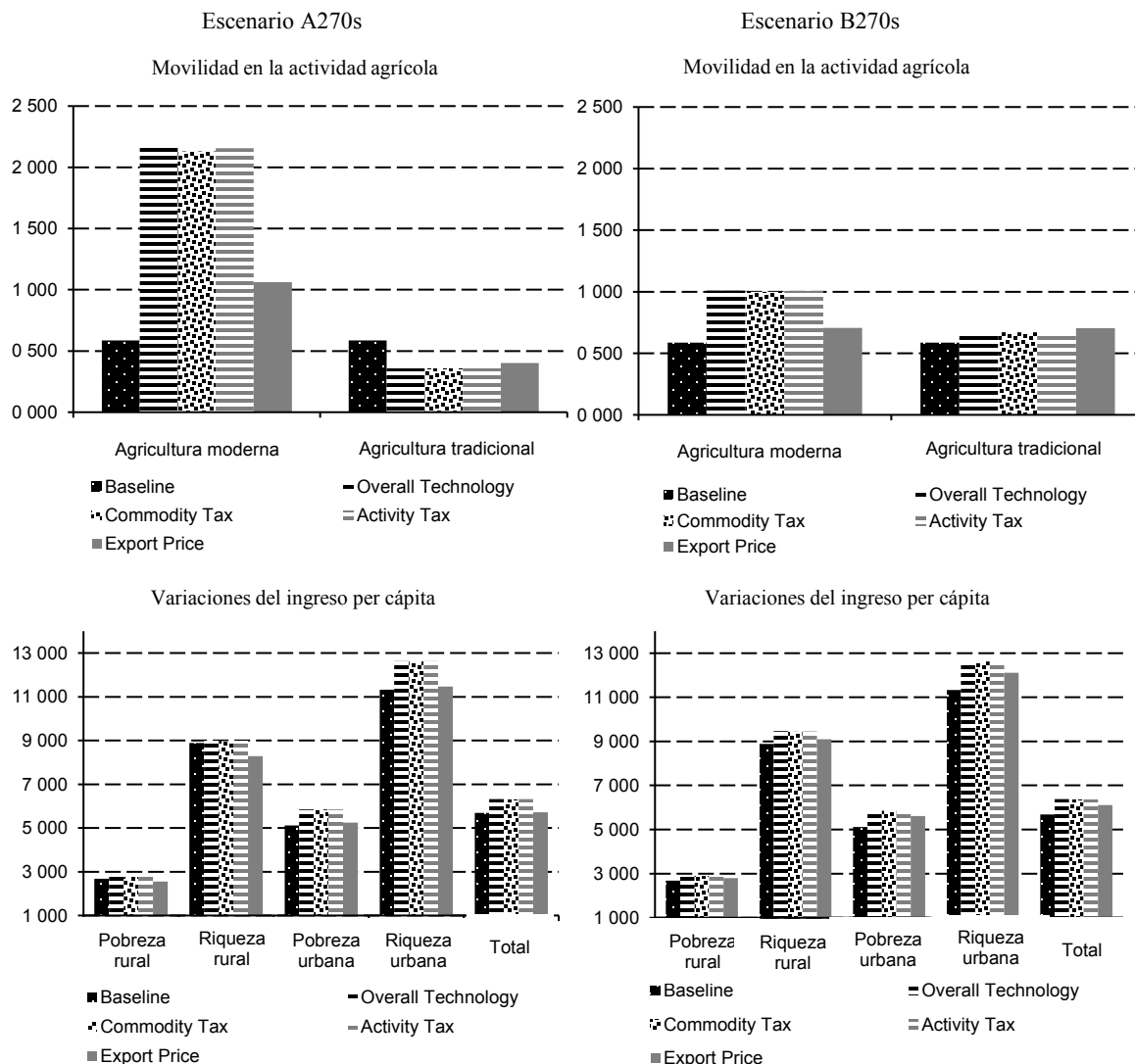
Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

El gráfico 7, muestra las variaciones del PIB, de la deforestación y el ingreso per cápita promedio en el largo plazo (2070s), con respecto al escenario base (sin medidas de adaptación). Se observa que el cambio climático (sin medidas), reducirá el PIB en el rango de -2 a -8%. Al mismo tiempo, se observa un incremento en el nivel de deforestación en el rango de +7 a +21%, en los escenarios A270s y B270s, respectivamente. Si se aplica la medida de adaptación de mejora integral de la tecnología de producción de manera independiente, se observa un incremento del PIB en el rango de +11 a +13%, y una disminución en el nivel de deforestación (-3 a -6%). Por otra parte, al aplicar la mejora integral de la tecnología de producción junto con impuestos a los bienes y/o a la actividad de agricultura moderna, no se observan variaciones significativas en el crecimiento del PIB (de +11 a +13%), mientras que el nivel de deforestación es el más bajo (-4 a -7%). Por último, al aplicar una reducción en los precios de exportación junto con la mejora en la tecnología de producción, se observan menores incrementos en el PIB (+4 a +6%), pero acompañados de mayores reducciones en el nivel de deforestación (-26 a -37%), siendo esta combinación de políticas, la más apta para lograr un desarrollo sostenible (mayores niveles de crecimiento acompañados de menores niveles de deforestación), al igual que lo observado en el corto plazo.

En el largo plazo, los impuestos en los bienes producidos por la agricultura moderna parecen ser más eficientes para reducir el nivel de dicha actividad, al igual que en el corto plazo. En este caso, el mayor efecto es para los ingresos de las compañías, mientras que el ingreso de los hogares, permanece casi constante. Por otra parte, al aplicar la reducción en los precios de exportación de los bienes producidos en la actividad de agricultura moderna, el nivel de dicha actividad es reducido, y se observa una movilidad hacia la agricultura tradicional solamente para el escenario B270s. Por último, la mayor reducción del ingreso per cápita promedio, se observa en los hogares rurales y urbanos ricos, así como en las compañías.

Gráfico 7

Mejora integral de la tecnología de producción y políticas macroeconómicas aplicadas en conjunto: impactos en la movilidad de la actividad agrícola y en el ingreso per cápita para el largo plazo (2070s)



Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

D. Costos sociales de conservación forestal

Las políticas gubernamentales aplicadas para reducir la deforestación y degradación de bosques son muy importantes para alcanzar la estabilidad climática global. En este sentido, los bosques proporcionan servicios ambientales que sirven como medios de vida de la sociedad además de ser sumideros que reducen la concentración de GEI en la atmósfera. En este sentido, cuando se protege una zona boscosa, los hogares dentro y alrededor de ella, están restringidos para destinarlo a otros usos, en muchos casos más rentables, como la agricultura y ganadería. Pero que tienen consecuencias en sus ingresos y en el agregado nacional. Por esta razón, existen algunos esquemas de pago o compensación para los hogares/países, tales como los Sistemas de Pago por Servicios Ambientales (PES) y el Mecanismo de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+), donde los “propietarios” de las áreas forestales son compensados monetariamente por terceras partes, con el compromiso de que ellos los conserven. Los fondos de este “incentivo económico”, pueden provenir de diferentes fuentes: por un lado, de sistemas del tipo PES (generalmente liderados por instituciones locales privadas y públicas); y por otro lado, de esquemas del tipo REDD+, con recursos financieros internacionales y globales. Al final de este capítulo, se trata de cuantificar un costo mínimo social de conservación de bosques por hectárea, utilizando los resultados de los diferentes escenarios de políticas mostrados en los anteriores puntos. El cuadro 3, muestra el PIB, la demanda por tierra y el costo social de conservación de bosques estimado (bolivianos/ha) por año para el corto y largo plazo en Bolivia, utilizando el escenario de aplicación de la medida de adaptación sobre “mejora integral en la tecnología de producción” de manera independiente, y el mismo escenario combinado con la política macroeconómica de “reducción de los precios de exportación”.

Como se observa, se estima un proxy del costo social de conservación de bosques por hectárea para el corto y largo plazo. La racionalidad de este cálculo radica en la siguiente premisa: *“una reducción en el nivel nacional de deforestación viene acompañada de una reducción en el nivel del PIB del mismo año, el cual debe ser compensado en términos monetarios para mantener, al menos, el bienestar de la sociedad en general”*. Para este propósito, se utilizan los sets de resultados de dos diferentes escenarios de política. Por un lado, las variables “PIB” y “demanda por tierra” son consideradas para los escenarios de “mejora integral de la tecnología de producción” (MIT) y por otro, los resultados del escenario de “mejora integral de la tecnología de producción” aplicado junto con la política macroeconómica de “reducción de los precios de exportación” (MIT+PE). Después, las “reducciones” del PIB y de la demanda por tierra son calculadas, sustrayendo los resultados de MIT+PE de los resultados de MIT. Luego, la reducción del PIB se divide entre la reducción de la demanda de tierra, teniendo como resultado final, un proxy del costo social de conservación de bosques por hectárea. Dicho costo se encuentra en el rango de 125 a 156 bolivianos/ha/año (140 en promedio) para el corto plazo (escenarios A220 y B220, respectivamente). Mientras que, para el largo plazo, se encuentra en el rango de 255 a 322 bolivianos/ha por año (289 en promedio), para los escenarios B270 y A270, respectivamente, que deberían ser pagados al Estado boliviano por conservar cada hectárea de bosque y compensar, al menos, a la sociedad por renunciar a los beneficios provenientes de otros usos.

Cuadro 3
Costo social estimado de conservación de bosques para el corto y largo plazo en Bolivia
(En bolivianos/ha/año)

| Corto plazo (2020s) | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------|------------|---|----------------|--------------------------|------------|
| Costo social de conservación de bosques: escenario A220s <i>(en bolivianos/ha/año)</i> | | | | Costo social de conservación de bosques: escenario B220s <i>(en bolivianos/ha/año)</i> | | | |
| PIB (MIT) | 22 771 263 505 | Demanda tierra (MIT) | 15 591 585 | PIB (MIT) | 23 503 355 072 | Demanda tierra (MIT) | 16 691 752 |
| PIB (MIT+PE) | 22 088 125 599 | Demanda tierra (MIT+PE) | 10 134 530 | PIB (MIT+PE) | 23 268 321 522 | Demanda tierra (MIT+PE) | 15 189 495 |
| Reducción PIB | 683 137 905 | Reducción demanda tierra | 5 457 055 | Reducción PIB | 235 033 551 | Reducción demanda tierra | 1 502 258 |
| Costo social (Red PIB/Red dem tie) | | | 125,18 | Costo social (Red PIB/Red dem tie) | | | 156,45 |
| Largo plazo (2070s) | | | | | | | |
| Costo social de conservación de bosques: escenario A270s <i>(en bolivianos/ha/año)</i> | | | | Costo social de conservación de bosques: escenario B270s <i>(en bolivianos/ha/año)</i> | | | |
| PIB (MIT) | 15 722 965 613 | Demanda tierra (MIT) | 11 875 812 | PIB (MIT) | 15 253 230 698 | Demanda tierra (MIT) | 11 474 085 |
| PIB (MIT+PE) | 14 307 898 708 | Demanda tierra (MIT+PE) | 7 481 761 | PIB (MIT+PE) | 14 490 569 163 | Demanda tierra (MIT+PE) | 8 490 823 |
| Reducción PIB | 1 415 066 905 | Reducción demanda tierra | 4 394 050 | Reducción PIB | 762 661 535 | Reducción demanda tierra | 2 983 262 |
| Costo social (Red PIB/Red dem tie) | | | 322,04 | Costo social (Red PIB/Red dem tie) | | | 255,65 |

Fuente: Elaboración de los autores con base en los resultados del modelo CGE recursivo dinámico.

IV. Conclusiones

Los resultados, confirman que el cambio climático tendrá efectos negativos en el sector agrícola y en la economía en general de Bolivia, sobre todo si no se toman las medidas y políticas necesarias, tanto en un escenario pesimista como en uno optimista (A2 y B2, respectivamente). En el corto plazo, se esperan reducciones del PIB nacional en el orden de -10% (en otras palabras 1.350.899.987 dólares por año); de la misma manera, se esperan incrementos en el nivel de deforestación, en un rango de +7 a +8% (en otras palabras, alrededor de 85.000 ha/año de pérdida boscosa adicional), si es que no se toman medidas y acciones para contrarrestar los efectos adversos del cambio climático. En el largo plazo, los impactos son mayores, con niveles de deforestación de alrededor de 240.000 a 320.000 hectáreas de deforestación adicional por año debido al cambio climático. Esto se puede explicar por los menores rendimientos por unidad de área en las actividades de agricultura tradicional y moderna, los cuales reducen los ingresos promedio netos e incrementan la demanda por tierra, dado que se requiere una mayor cantidad para cubrir la demanda de alimentos.

Cuando se aplican algunas medidas de adaptación a nivel micro (fertilización, irrigación, cambio en la fecha de siembra y mejora integral en la tecnología de producción), se observan mayores rendimientos por unidad de área para la mayoría de los escenarios de cambio climático. Por un lado, la fertilización no tiene un efecto muy significativo en el incremento de los rendimientos de los cultivos, por lo que la fertilidad de los suelos no parece ser un problema en las principales zonas de producción analizadas en el departamento de Santa Cruz, Bolivia. Por otro lado, la irrigación tampoco muestra un efecto significativo en los rendimientos, debido a que, en la mayoría de los escenarios de cambio climático, se observan incrementos en las precipitaciones (en el rango de +10 a +74%), lo que reduce el estrés hídrico para los cultivos sembrados a secano. Sin embargo, en el escenario B270, muestra una reducción en las precipitaciones donde la medida de adaptación sí es efectiva, mostrando incrementos en la productividad en el rango de +1 a +11%, dependiendo de la zona de producción y cultivo.

Al analizar, el cambio en la fecha de siembra se observa que es una medida de adaptación muy efectiva especialmente en el corto plazo, mostrando incrementos en el rendimiento de los cultivos en el rango de +23 a +35%, e incrementos en el PIB de +12 a +16%, con respecto al escenario sin medidas de adaptación. Sin embargo, en el largo plazo, esta medida no es suficiente, dado que los impactos del cambio climático son mucho más intensos (condiciones más calientes y mayores variaciones en las precipitaciones). Es por ello que la mejora integral en la tecnología de producción es la medida de adaptación a nivel micro más efectiva, mostrando incrementos del PIB en el orden de +56 a +60% en el corto plazo y +11 a +13% en el largo plazo. No obstante, el incremento de los rendimientos de cultivos otorga el incentivo adverso de una mayor demanda por nueva tierra, dada la nueva rentabilidad de estas actividades, con incrementos en el nivel de deforestación en el rango de +23 a +34%.

Para cubrir la demanda de alimentos y conservar los bosques naturales, se aplican una serie de acciones macroeconómicas (impuesto a los bienes agrícolas, impuesto a las actividades agrícolas y reducción en el precio de exportación de bienes agrícolas), junto con la medida de adaptación microeconómica más efectiva (mejora integral en la tecnología de producción). Al analizar los resultados, se observa que tanto el impuesto a los bienes producidos por agricultura moderna, como el impuesto directo a la actividad de agricultura moderna, tienen un impacto mínimo en los niveles del PIB y de deforestación. Ello se puede explicar por los bajos porcentajes de impuestos observados en el escenario base (0,03% y 3% para actividades y bienes, respectivamente). Sin embargo, una política fiscal más estricta, podría tener los impactos deseados para reducir la deforestación e incrementar el crecimiento económico, lo cual, se traducirá en un mayor bienestar para la sociedad.

Por otra parte, se aprecia que la reducción de los precios de exportación, es mejor la política macroeconómica conjunta, en términos de desarrollo sostenible, mostrando incrementos del PIB en el orden de +53% para el corto plazo y +4% en el largo plazo y reducciones en el nivel de deforestación en el orden de -35% en el corto plazo y -33% en el largo plazo en promedio. La combinación de estas políticas en comparación a la medida de adaptación microeconómica aplicada de manera individual, reduce el PIB en -5% en promedio, situación más que superada con la reducción de la deforestación (alrededor de -35%), lo que confirma que las políticas a nivel micro y macro aplicadas de una forma planificada y coordinada, pueden llevar a un desarrollo sostenible. Sin embargo, la reducción en el PIB y en el ingreso per cápita, causado por la protección de bosques, debería ser compensada para mantener, al menos, el nivel de bienestar de los hogares y la sociedad en general. En este sentido, existen mecanismos a los cuales se puede acceder como el sistema PES y el esquema REDD+, donde los países en desarrollo que poseen bosques naturales, pueden recibir compensaciones económicas de los sectores público y/o privado, local e internacional, si se comprometen a proteger/conservar sus bosques naturales.

Al final, el estudio estima un proxy del costo social de conservación de bosques por hectárea en Bolivia, el cual debería compensar a la economía; en otras palabras, este es el costo mínimo de compensación por hectárea para conservar el bosque y renunciar a actividades más rentables de uso de suelo. El costo promedio estimado para el corto plazo es de 140 unidades monetarias/ha por año, y para el largo plazo es de 289 unidades monetarias/ha por año. Los costos, determinados con un enfoque objetivo, pueden servir como puntos de partida para negociaciones en esquemas del tipo PES o REDD+ en el contexto de acuerdos globales de cambio climático, y también pueden ser útiles para compararlos con los costos derivados de otras técnicas de valoración económica (como el método de valoración contingente, costo de viaje, entre otros), que utilizan técnicas de cuantificación más subjetivas y dependientes de las expectativas personales.

Para concluir, el estudio es novedoso en el contexto de la ciencia de la sostenibilidad y en los esquemas de adaptación/mitigación, pero puede ser más desarrollado ampliamente con una matriz de contabilidad social, más desagregada, donde el sector agrícola pueda estar desglosado en actividades individuales y bienes individuales (soya, maíz, arroz, caña de azúcar, entre otros). De la misma manera, se recomienda investigar con mayor profundidad el tratamiento de la tierra como un factor de producción heterogéneo para la agricultura y bosques, como actividades de uso de suelo alternativas.

Evidentemente, se cumplió con el objetivo principal, demostrando que la coordinación de políticas públicas a nivel micro y macro (o “Policy Mainstreaming”), es una forma efectiva, eficiente y equitativa de alcanzar el doble objetivo de cubrir las necesidades de la sociedad y de mantener los sistemas de soporte de vida del planeta. También se demostró que las políticas de adaptación aplicadas de manera coordinada y conjunta, pueden tener co-beneficios adicionales en los planes de mitigación del país; resaltando la importancia del diálogo entre la ciencia y la toma de decisiones, para lograr un desarrollo sostenible.

Bibliografía

- Abdula, R. (2006), Climate change policy of bio-energy: A Computable Equilibrium Analysis of bio-energy's sectoral and land-use interfaces. Department of Economics, University of Gothenburg, Sweden.
- Andersen, L. and Faris, R. (2006), Gas natural y distribución de ingresos en Bolivia. Instituto de Investigaciones Socio-Económicas, Universidad Católica Boliviana, La Paz, Bolivia. Center for International Development Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Banco Central de Bolivia (BCB) (2003), Memoria 2003.
- Burniaux, J.M. and Lee, H.L. (2003), Modeling land use changes in GTAP. Paper presented at the Sixth Annual Conference on Global Economic Analysis, The Hague, Netherlands.
- Cámara Agropecuaria del Oriente (CAO) (2010), Evaluación del desempeño del sector agropecuario en el departamento de Santa Cruz.
- Cattaneo, A. (2002), Balancing agricultural development and deforestation in the Brazilian Amazon. Research report 129, International Food Policy Research Institute (IFPRI). Washington, D.C.
- Darwin, R., Tsigas, M., Lewandrowski, J., & Ranases, A. (1995), World agriculture and climate change: economic adaptations. Agricultural Economic Report 703. Natural Resources and Environment Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- Devarajan, S., Go, D. S., Lewis, J. D., Robinson, S. and Sinko, P. (1997), Simple General Equilibrium Modeling in applied methods for trade policy analysis: A handbook, ed. J. F. Francois and K. A. Reinert. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dervis, K., de Melo, J., and Robinson, S. (1982), General Equilibrium Models for development policy. Cambridge University Press, New York.
- Gemio, L.C. and Wiebelt, M. (2002), Impactos macroeconómicos de shocks externos y políticas anti-shock en Bolivia: Un análisis EGC. Working Paper N° 1100. The Kiel Institute for the World Economy, Kiel.
- Golub, A., Hertel, T. y Sohngen, B. (2007), Projecting supply and demand for land in the long run. Paper for presentation at the American Agricultural Economics Association Annual Meeting. Portland, Oregon.
- Hertel, T. (1997), Global trade analysis: modeling and applications. New York: Cambridge University Press.
- Hertel, T., Lee H.L., Rose, S. and Sohngen, B. (2006), Land heterogeneity in determining climate change mitigation costs. (Paper presented at the 9th annual conference on global economic analysis).
- Hertel, T., S. Rose and R.S.J. Tol (2009), Land use in computable general equilibrium models: an overview. In Economic analysis of land use in global climate change policy, T.W. Hertel et al. (eds.). Routledge.
- Ianchovichina, E., Darwin, R. and Shoemaker, R. (2001), Resource use and technological progress in agriculture: A dynamic general equilibrium analysis. *Ecological Economics*, 38, 275-291.
- IFPRI (2009), Climate change, impact on agriculture and costs of adaptation. IFPRI.
- Ignaciuk, A.M. (2006), Economics of multifunctional biomass systems. Wageningen University, Netherlands.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2013 [en línea], <http://www.ine.gov.bo>.
- IPCC (2001), Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johansen, L. (1960), A multi-sectoral study of economic growth. Amsterdam: North-Holland.
- Kaimowitz, D. (1997), Factors determining low deforestation: the Bolivian Amazon. *Ambio*, 26 (8).

- Kaimowitz, D. and Angelsen, A. (1998), Economic models of tropical deforestation: A review. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Kaimowitz, D., Thiele, G. and Pacheco, P. (1999), The effects of structural adjustment on deforestation and forest degradation in lowland Bolivia. *World Development*, 23 (3).
- Killeen, T.J., et al. (2007), Thirty years of land-cover change in Bolivia. Working paper.
- Klein, R.J.T., Schipper, E.L. and Dessai, S. (2005), Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions. *Environ. Sci. Policy* 8.
- Lay, J., Thiele, R., and Wiebelt, M. (2006), Resource booms, inequality, and poverty: The case of gas in Bolivia. Kiel Working Paper N° 1287. The Kiel Institute for the World Economy, Kiel.
- Lee, H.L. (2004), Incorporating agro-ecological zoned data into the GTAP framework. Paper presented at the Seventh Annual Conference on Global Economic Analysis, The World Bank, Washington, D.C.
- Lofgren, H. et al. (2002), A standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS. *Microcomputers in Policy Research* 5. International Food Policy Research Institute.
- Mendelsohn, R., Dinar, A. and Williams, R. (2006), The distributional impacts of climate change on rich and poor countries. *Environment and Development Economics* 11: 159-178. Cambridge University Press.
- Ministerio de Planificación del Desarrollo (MPD), Programa Nacional de Cambios Climáticos (PNCC) e Instituto Nacional de Estadística (INE) (2007), Inventario de emisiones de GEI, según categoría de fuente 1990–2000, agosto de 2007, [en línea] <http://www.ine.gov.bo/cgi-bin/piwdie1xx.exe/TIPO>.
- Nakicenovic, N., et al. (2000), Special report on emission scenarios, Cambridge University Press, London.
- Pacheco, P. (2006), Agricultural expansion and deforestation in lowland Bolivia: the import substitution versus the structural adjustment model. *Land Use Policy*, 23, 205-225.
- _____ (1998), Estilos de desarrollo, deforestación y degradación de los bosques en las tierras bajas de Bolivia. CEDLA, CIFOR, TIERRA. La Paz, Bolivia.
- Parry, M. et al. (2004), Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ. Change*, 14:53–67.
- Priestley, C and Taylor, R. J. (1972), On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters.
- Robinson, S. et al. (1999), From stylized to applied models: Building multisector CGE models for policy analysis. *The North American Journal of Economics and Finance*, 10, 5-38.
- Rojas, D. et al. (2003), Tasa de deforestación de Bolivia 1993-2000. BOLFOR, Bolivia.
- Ross, M., Depro, B., and Pattanayak, S.K. (2007), Assessing the economy-wide effects of the PSA program. Prepared for Ecomarkets: Costa Rica's experience with Payments for Environmental Services. Marzo de 2008, [en línea], <http://siteresources.worldbank.org/INTEEI/Resources/CostaRica-11-CGE.pdf>.
- Seiler, C. (2009), Implementation and validation of a regional climate model for Bolivia. FAN-Bolivia.
- Servicio de Impuestos Nacionales (SIN), 2006. Actualización cuota fija por hectárea del Régimen Agropecuario Unificado (RAU). Resolución Normativa de Directorio N° 10.0028.06. Agosto de 2007 [en línea], <http://www.impuestos.gov.bo/Informacion/Normativa/upload/resos/RND10-0028-06.pdf>.
- Steininger, M. et al. (2001), Tropical deforestation in the Bolivian Amazon. *Environmental Conservation*, 28 (2).
- Thurlow, J. (2004), A dynamic Computable General Equilibrium (CGE) Model for South Africa: Extending the Static IFPRI Model. Trade and Industrial Policy Strategies (TIPS). Working Paper 1-2004.
- Turner B., et al. (2003), A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainable Science. PNAS, U.S.A.
- Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas (UDAPE) (2006), Sector agropecuario Bolivia (1990-2004). La Paz, Bolivia.
- Van der Werf, E., and Peterson, S. (2007), Modeling linkages between climate policy and land use: An overview. Nota di lavoro 56.2007. Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Viscarra, F.E. (2014), Climate change impacts and efficient adaptation options in the Bolivian agriculture: From crop models to integrated assessments. Ca' Foscari University of Venice, 2014. <http://hdl.handle.net/10579/3966>.
- _____ (2010), Calibration and validation of CERES and CROPGRO Crop models for rice, maize and soybeans in Santa Cruz, Bolivia. Adaptation to Climate Change Departmental Pilot Program. Fundación Amigos de la Naturaleza.
- Wachholtz, R., Artola, J.L., Camargo, R. and Yucra, D. (2006), Avance de la deforestación mecanizada en Bolivia. Superintendencia Forestal, Santa Cruz, Bolivia.
- Wong, G.Y., and Alavalapati, J.R.R. (2003), The land-use effects of a forest carbon policy in the US. *Forest Policy and Economics*, 5.
- Xie, J., Vicent, J.R., and Panayotou, T. (1996), Computable general equilibrium models and the analysis of policy spillovers in the forest sector. *Environment Discussion Paper* N° 19. Cambridge, Mass.
- Xiong, W., Holman, I., Declan, C., Erda, L., and Yue, L. (2008), A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. *Ecological Modeling*, 213 (2008); (365-380).

En los últimos años, la frontera agrícola en el Estado Plurinacional de Bolivia se ha expandido considerablemente. Debido al cambio climático, se espera una reducción del rendimiento de los cultivos, lo que producirá una nueva expansión en dicha frontera. Por este motivo, es necesario desarrollar una agricultura más eficiente, que incluya medidas de adaptación vinculadas a políticas macroeconómicas de protección de los recursos naturales. Para cuantificar el impacto y la eficacia de estas medidas, en el estudio se utilizan modelos de simulación matemática para el rendimiento de los cultivos, vinculados a un modelo de equilibrio general computable dinámico recursivo. Se evalúan cuatro medidas de adaptación microeconómicas que contrarrestan el impacto del cambio climático e incrementan el rendimiento de los cultivos.

Los resultados muestran que la mejora integral de la tecnología de producción es la medida de adaptación microeconómica más efectiva para aumentar el rendimiento de los cultivos, el producto interno bruto (PIB) y el ingreso promedio de los hogares. Sin embargo, este incremento va acompañado del incentivo adverso de una mayor demanda de tierra. Para contrarrestarlo, se aplican medidas macroeconómicas que simulan un escenario de coordinación de políticas públicas a nivel micro y macro (*o climate policy mainstreaming*) y de desarrollo sostenible. La conclusión es que la mejor política macroeconómica es la restricción de los precios de exportación, dado que no solo reduce la magnitud de la tasa de deforestación, sino que también mantiene los niveles de crecimiento de la economía.