LAJED N° 37 Mayo 2022 - Octubre 2022 45 - 86
ISSN: 2074 - 4706

Impacto económico de las medidas de mitigación de las NDC de Bolivia

Economic impact of Bolivia's NDC mitigation measures

Autores:

*Luis E. Gonzales C. *, Alfonso Malky Harb**, Sergio Bobka***, Juan Carlos Torrico****, Marek Antosiewicz+, Carla Mendizábal++, Sophía Espinoza+++*

Colaboradores:

Andrés Pica, José Miguel Valdés, Daniela Quiroga y Catalina Marinkovic++++

Resumen

Bolivia es uno de los países más vulnerables al cambio climático por sus condiciones físicas y nivel de desarrollo. Inserto en los esfuerzos mundiales de mitigación de emisiones de gases

* Coordinador Económico de Cambio Climático, Energía y Medio Ambiente de CLAPES UC, Pontificia Universidad Católica de Chile.
Contacto: lwgonzal@uc.cl

** Director Técnico de Conservation Strategy Fund (CSF) para América Latina.
Contacto: alfonso@conservation-strategy.org

*** Investigador Conservation Strategy Fund (CSF)
Contacto: sergiobobka@gmail.com

**** Director de Mitigación - Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra
Contacto: juan.torrico@madretierra.gob.bo

+ Investigador de Institute for Structural Research (IBS)
Contacto: marek.antosiewicz@ibs.org.pl

++ Investigadora Conservation Strategy Fund (CSF)
Contacto: carla@conservation-strategy.org

+++ Investigadora Conservation Strategy Fund (CSF)
Contacto: sophia@conservation-strategy.org

++++ Andrés Pica y Catalina Marinkovic son investigadores de Centro de Cambio Global UC y José Miguel Valdés y Daniela Quiroga son investigadores de DCITUC de la Pontifica Universidad Católica de Chile.

de efecto invernadero, el país define medidas a través de las NDCs. En este estudio se estiman los costos y beneficios económicos que estas medidas generan, y se observa que aquéllas enfocadas en los sectores energía y forestal podrían generar un crecimiento adicional del 2.7% en el PIB proyectado al año 2050. Esto representa un valor presente de US$ 15,500 millones adicionales y la generación de empleo neto. El costo de implementación de las medidas representaría el 30% del PIB a valor presente, y su financiamiento dependería de fuentes internas y externas. Finalmente, se proyecta que la postergación de las metas de reducción de deforestación previstas hasta 2030 conllevaría una emisión de más de 830 millones de toneladas adicionales de CO2eq hasta el año 2050, con ganancias marginales en el PIB.

Palabras clave: Cambio climático; NDCs; emisiones de gases de efecto invernadero; medidas de mitigación; deforestación; costo-eficiencia; PIB.

Abstract

Bolivia is one of the most vulnerable countries to climate change both because of its physical conditions and development level. Contributing to the global efforts to mitigate greenhouse gas emissions, the country defines measures through their NDCs. This study estimates the economic costs and benefits that these measures generate, and notes that those focused on the forestry and energy sectors could generate a 2.7% annual growth in GDP above the amount projected by 2050. This represents a present value of an additional US$ 15.5 billion as well as net employment generation. The cost of implementing these measures is estimated to represent 30% of the GDP in present values, and their financing would depend on internal and external sources. Finally, it projects that delaying deforestation reduction targets would imply an additional 830 million tons of CO2eq emissions by 2050, with marginal gains in GDP.

Keywords: Climate Change; NDCs; Greenhouse Gas Emissions; Mitigation Measures; Deforestation; Cost-efficiency; GDP.

Clasificación/Classification JEL: O5, Q54, Q56,

1. Introducción

El Estado boliviano enfrenta el cambio climático desde la perspectiva del "Vivir bien" y en armonía con la Madre Tierra. A esto se suman otras políticas que aportan al enfoque de acción climática de Bolivia, el cual incluye un mecanismo conjunto de mitigación y adaptación al cambio climático, orientado al desarrollo integral y de atención a grupos vulnerables. Bajo esta perspectiva, el Estado articula todas sus acciones en cuanto se refiere al cambio climático y, por consiguiente, en cuanto a las Contribuciones Determinadas Nacionalmente (en adelante NDCs, por su sigla en inglés). Bolivia realizó la actualización de sus NDCs con el objetivo de reducir sus emisiones al 2030 y aportar al esfuerzo global de mantener el incremento de temperatura media mundial en 1.5 grados centígrados. El conjunto de medidas consideradas responde al compromiso que el país tomó al formar parte del Acuerdo de París, y le da continuidad al primer conjunto de medidas presentadas en 2016 ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Adicionalmente a las NDCs, Bolivia da a conocer sus acciones de manera periódica mediante las Comunicaciones Nacionales. Hasta la fecha en la que se desarrolló este estudio, existían tres Comunicaciones Nacionales, la más reciente lanzada en 2020, a cargo de la Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra (APMT). En esta Tercera Comunicación Nacional, Bolivia presentó los inventarios de gases de efecto invernadero (InGEI) para los años 2006 y 2008, los cuales representan una actualización de la composición de las emisiones para los años mencionados, considerando diferentes sectores económicos. El sector que más destaca es el de Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS, por su sigla en inglés).

Bolivia cuenta con InGEI desde 1990 hasta 2008, con una secuencia de años pares desde 1994. Tomando en cuenta este periodo de tiempo, entre 1990 y 2006, las emisiones del sector UTCUTS crecieron, en promedio, en 8% entre cada medición del inventario. Solamente existió una reducción de emisiones de 8% en 2008 respecto al inventario de 2006 (Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, 2020).

Aproximadamente el 50% del territorio boliviano está cubierto por bosques y un sistema de producción agropecuaria extensiva (Cámara Forestal de Bolivia, 2021). En los últimos 20 años, Bolivia ha perdido más de 6.1 millones de hectáreas de bosques tropicales (Global

Forest Watch, 2021), lo que equivale a una disminución del 10% de la cobertura arbórea total, ubicándose sólo detrás de Brasil, a nivel regional. La tasa de deforestación anual promedio para el periodo 2016-2020 fue de 503,500 Ha., la cual es mayor a la que se observó en el periodo 2001-2015, que fue de 239,800 Ha. Estos datos reflejan la razón por la cual el sector UTCUTS es el que más emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) aporta al InGEI.

Los incendios también están directamente relacionados a procesos de cambio de uso del suelo y ampliación de la frontera agropecuaria. En 2019, Bolivia vivió el mayor desastre ambiental de su historia, reportando más de 5.3 millones de hectáreas afectadas por incendios, de las cuales 1.5 millones del área quemada correspondía a bosques (Fundación Amigos de la Naturaleza, 2019). En 2020, a pesar de la pandemia y la suspensión temporal de todas las autorizaciones de quema, los incendios forestales alcanzaron a más de 4 millones de hectáreas en el país, de las cuales 600 mil hectáreas correspondían a bosques. A partir de estos eventos, Bolivia se ubicó entre los tres países con mayor deforestación de bosques primarios a nivel mundial, y es el país con mayor deforestación *per cápita* del mundo (Global Forest Watch, 2021).

El año 2020, los incendios afectaron una mayor superficie de áreas protegidas en relación a 2019. De la superficie quemada total en 2020, un 39% se produjo dentro de áreas protegidas, tanto nacionales como subnacionales (FAN y WCS, 2021). La quema de áreas con altos niveles de biomasa genera un impacto alarmante en términos climáticos, ya que no solo se pierde el carbono almacenado por los bosques, sino que también se pierde su capacidad de absorción futura (Pellegrini *et al.*, 2021).

Durante el desarrollo de este estudio, el gobierno boliviano estaba en proceso de actualizar las NDCs, en el marco de la Conferencia de las Partes (COP 26) que se llevó a cabo en noviembre de 2021 en Glasgow, Reino Unido. En esta misma línea, el gobierno viene trabajando en colaboración con la cooperación internacional, organizaciones de la sociedad civil y la academia, en la cuantificación de las emisiones, las opciones para reducir emisiones futuras e incrementar la capacidad de los bosques bolivianos de mitigar el cambio climático, la promoción de medidas de adaptación para las poblaciones más vulnerables, los requerimientos de financiamiento para implementar las medidas de mitigación y adaptación, y la proyección de los impactos económicos que tendrán las medidas incluidas en las NDCs.

Este documento busca contribuir en este último punto, a partir del análisis del impacto económico de un portafolio de medidas sectoriales, la estimación del costo-eficiencia de éstas, su impacto en el desempeño macroeconómico, la comparación del mismo respecto a un escenario-base y la proyección de emisiones de GEI en los escenarios analizados.

Este artículo se compone de cuatro partes. La segunda sección describe los datos y métodos usados en el análisis. La tercera sección presenta los resultados de las estimaciones del impacto económico de las medidas de mitigación establecidas en las NDCs de Bolivia. Finalmente, la cuarta sección resume y discute las principales conclusiones del análisis.

2. Materiales y métodos

El proceso de estimación de los impactos económicos de las medidas de mitigación analizadas se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Recolección de datos y construcción de una línea-base: Proyección del comportamiento de la economía sin consideración de medidas hasta 2050.
2. Estimación de costos de cada medida seleccionada: costeo del gasto en capital y operación de las acciones de mitigación. En este paso se emplean modelos econométricos para las medidas sectoriales con la calibración con base en datos históricos y proyecciones a futuro (ver anexo metodológico).
3. Estimación de una medida cuantitativa de costo-eficiencia: se calcula en función a la capacidad de reducción de emisiones y el costo de cada medida.
4. Estimación del costo total asociado a la implementación de las medidas: cuantificación del monto total necesario para implementar el plan de mitigación al 2050.
5. Estimación del impacto económico: impacto macroeconómico, en nivel del producto, demanda agregada y actividades de los sectores de las medidas. En este paso se utiliza como input los resultados de la estimación de costos de cada una de las medidas (paso 2) y la desagregación del impacto económico en cada sector, utilizando el modelo de equilibrio general dinámico y estocástico descrito en el anexo metodológico.

2.1. Datos y consideraciones para la construcción de la línea-base

Para establecer los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero es importante, en primera instancia, simular el comportamiento de la economía a través del producto (PIB) y asumir la dinámica del crecimiento de la población en un horizonte de tiempo. En este trabajo se observa el comportamiento de las medidas hacia el año 2050, en consideración a que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés) estableció que ése es el año en que la humanidad debe alcanzar las emisiones netas en cero, para evitar el incremento de la temperatura por encima de los 2°C (IPCC, 2022).

Para el comportamiento del crecimiento de la población se usaron datos históricos del Banco Mundial (BM). En el caso del producto, se usaron datos del PIB *per cápita* a precios constantes, expresados en bolivianos, de la misma fuente. En el caso de emisiones de CO2eq *per cápita*, se usaron datos del BM para emisiones en el sector energético y datos de *Climate Watch* para emisiones de los sectores no energéticos. En el Cuadro 1 se presentan estos datos.

Cuadro 1
Resumen de datos de población, PIB *per cápita* y emisiones de CO2eq *per cápita*

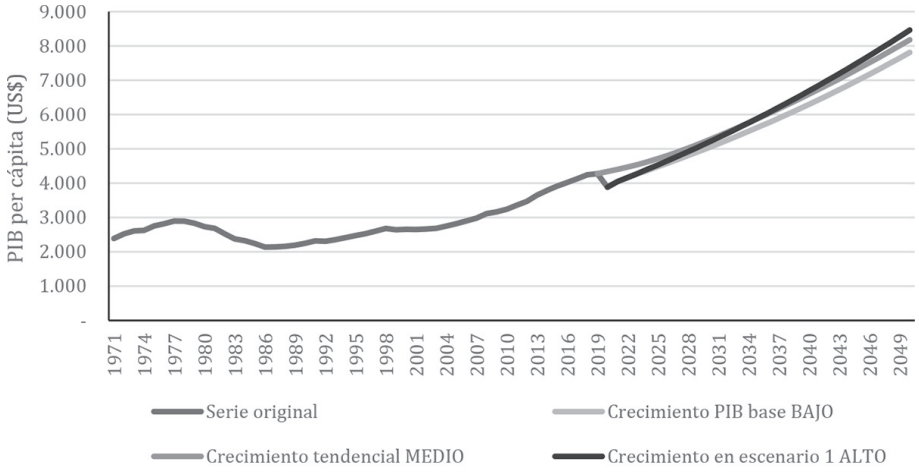
Periodo	Variación anual promedio de población	Variación anual promedio del PIB *per cápita*	Variación anual promedio de emisiones de CO2 *per cápita*
1970 - 1990	2.15%	-0.25%	-
1991 - 2010	1.92%	1.86%	0.54%
2011 - 2019	1.52%	3.13%	-3.24%

Fuente**:** Elaboración propia con base en información del Banco Mundial y Climate Watch

Para las proyecciones del sector energético se utilizaron datos de uso de energía general y uso de energía alternativa. Para el primero se emplearon datos del BM referidos a uso de energía *per cápita*, expresados en kilogramos equivalentes de petróleo *per cápita*. En cuanto a energías alternativas, se trabajó con el dato del porcentaje de uso de energía alternativa, respecto al total de uso de energía del BM y se lo multiplicó por el uso de energía para obtener un valor de uso de energía alternativa *per cápita.* Para el sector no energético se utilizaron datos del año 1990 y del periodo 2000-2019 de FAOSTAT y Climate Watch, respectivamente.

Con esta información de entrada y con base en los modelos econométricos descritos en el anexo, se estimó la evolución del PIB por cada habitante, ajustado por poder de compra hasta el año 2050. Se puede apreciar que el nivel de producto por persona el año 2019 era de US$ 9,000 y, con las distintas tasas de crecimiento del producto y de la población, se esperaría alcanzar un ingreso *per cápita* de cerca de US$ 16,000 el año 2050 (Gráfico 1).

Gráfico 1: PIB *per cápita* a 2050



Fuente**:** Elaboración propia con base en datos del INE, Banco Mundial y FMI.

2.2. Línea-base y medidas de las NDCs

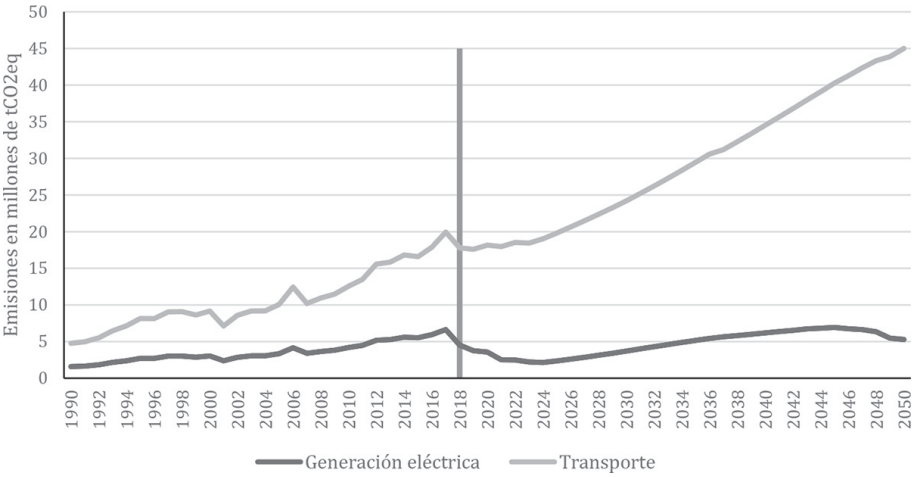
Con base en los datos y modelos presentados en el anexo, se estimaron líneas-base de emisiones para el sector energético y forestal. Dichas líneas-base tienen el objetivo de hacer predicciones de las emisiones, sin el efecto de las medidas.

2.2.1. Proyecciones sector energético

Dentro del sector energético se hizo una subdivisión en dos sectores: generación eléctrica y transporte. En el Gráfico 2 se presentan las emisiones de ambos sectores; a la izquierda de la línea negra se presentan los datos históricos y a la derecha las estimaciones realizadas por el modelo. Se puede observar que existe una tendencia al crecimiento de las emisiones en el

sector transporte, la cual se mantiene en la proyección. Mientras que en el sector de generación eléctrica el crecimiento de las emisiones es mucho menor[1].

Gráfico 2: Emisiones del sector energético por subsector, en millones de toneladas de CO2eq



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo econométrico estimado.

2.2.2. Proyecciones sector forestal

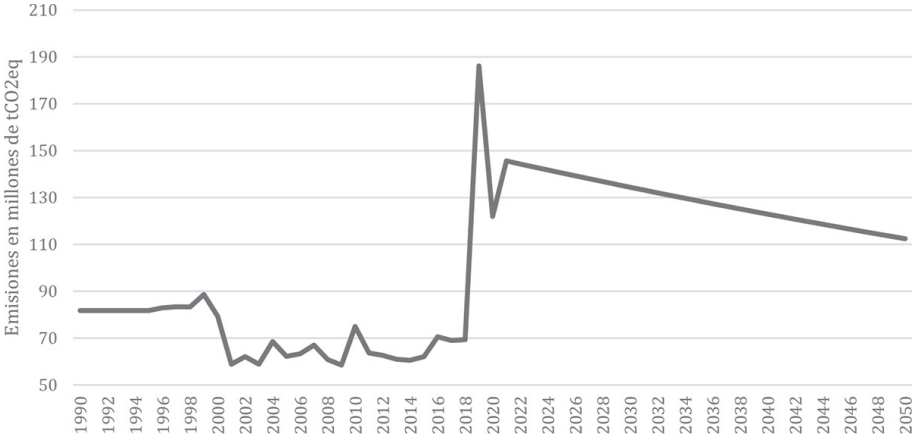
En el sector forestal se utilizó un modelo dinámico con información de la cobertura forestal presentada por Global Forest Watch. Esta proyección se puede apreciar en el Gráfico 3, donde se observa un crecimiento inicial de las emisiones y luego una tendencia decreciente. El decrecimiento se explica por la pérdida neta de cobertura forestal anual, dado que el cálculo considera una reducción de cobertura anual (basada en tendencias históricas), tasas diferenciadas por tipo de bosque (áreas protegidas nacionales, áreas protegidas sub-nacionales y áreas no protegidas) y una tasa de regeneración natural del bosque de 10%.

El abordaje considerado para estimar la pérdida de cobertura y las emisiones pretende capturar la tendencia histórica de deforestación de Bolivia (incluyendo el incremento de las tasas de deforestación observado durante los últimos años). También considera algunos

1 Esta modelación no tomó en cuenta la construcción de megarepresas en la Amazonía, dado que está demostrado que estos proyectos son emisores netos de CO2eq. Además, se estableció un orden de entrada de las centrales, con base en la cronología de construcción de las mismas.

supuestos sobre la capacidad del sector agropecuario de mantener tasas de cambio de uso del suelo altas durante periodos prolongados. Estos supuestos fueron considerados porque, de mantenerse las tasas de deforestación recientemente observadas hasta el año 2050, desaparecería casi el total de los bosques de Bolivia. Este, si bien es un escenario posible, no es un escenario probable debido a los compromisos (a nivel nacional y subnacional), y al interés de la comunidad internacional por revertir los procesos de deforestación, principalmente en ecosistemas como la Amazonía y el bosque seco chiquitano.

Gráfico 3: Emisiones del sector forestal, en millones de toneladas de CO2eq



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo econométrico estimado.

2.2.3. Medidas de la actualización de las NDCs de Bolivia

El análisis presentado en este documento considera 10 medidas de mitigación de los sectores forestal y energético (Cuadro 2). Estas medidas fueron seleccionadas por su relevancia en el contexto global y boliviano, su presentación en distintos documentos oficiales en Bolivia y la existencia de datos para su análisis.

Cuadro 2
Clasificación de las medidas incluidas en el análisis, por sector

Sector	Medida	Meta
Energía	Energías renovables	Alcanzar un 79% de la generación eléctrica en energías renovables al 2030
	Alumbrado público	Reemplazo anual de 10 mil luminarias convencionales a luminaria LED
	Electromovilidad	Reemplazo del parque automotor convencional a vehículos eléctricos
	Mi Teleférico	Implementación de una nueva línea hasta el año 2050, alcanzando un incremento en 11 km de la red de Mi Teleférico
	Tren metropolitano	El proyecto se encuentra implementado y en funcionamiento para el año 2022
Forestal	Deforestación ilegal	La deforestación ilegal se reduce de manera gradual hasta llegar a un 45% al año 20302
	Gestión comunitaria MIB	Se reduce la deforestación en un 37% en áreas de cobertura forestal que no pertenece a áreas protegidas
	Producción forestal maderable y no maderable	Reducción gradual de la deforestación ilegal en un 5% en áreas de producción forestal
	Incendios forestales	Reducción gradual de 45,200 Ha por año en la deforestación ilegal, gracias al control de incendios
	Incremento superficie forestal	Incremento de la superficie forestal a 2.25 MM ha. al año 2030, lo que significa incrementar la tasa de regeneración antropogénica a un 50% de la tasa de pérdida de cobertura forestal

Nota: Las medidas Mi teleférico y Tren metropolitano no fueron incluidas en la revisión de las NDC 2021-2030, pero sí habían sido consideradas en versiones previas, por lo que se decidió mantenerlas. Las metas consideradas en el estudio fueron definidas de acuerdo a la revisión de la NDC, y también en función a la información disponible necesaria para las estimaciones.
Fuente: Elaboración propia con base en revisiones bibliográficas.

Se priorizaron las 10 medidas señaladas en el Cuadro 2 por tener características y metas explícitas que permiten alcanzar estimaciones confiables. Una vez identificadas las medidas se procedió a calcular el costo de capital (CAPEX), el costo de operación (OPEX) y la capacidad de mitigación de cada medida. De esta manera, fue posible establecer la costo-eficiencia de cada medida y, consiguientemente, su impacto económico y ambiental. Adicionalmente, se utilizó un criterio de relevancia de las medidas sobre el efecto total. Esto significa que cada una

2 Con base en información de la ABT (Autoridad de fiscalización y control social de bosques y tierra), sobre el análisis de deforestación para el período 2016-2017 (Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia, 2018), se consideró que el 52% del total de la deforestación corresponde a deforestación ilegal. Ante la ausencia de datos para otros años, se consideró ese porcentaje para todo el análisis.

de las medidas tiene un impacto específico en la reducción de emisiones totales y un costo asociado.

2.3. Costos de implementación de las medidas del sector Energía

Con base en la información y las metas propuestas para cada medida, se procedió a realizar una evaluación y propuesta de los costos de implementación, la cual es descrita en detalle en los siguientes puntos.

2.3.1. Energías renovables

El costo promedio de inversión por kW, para cada tipo de central, está reflejado en el Cuadro 3.

Cuadro 3
Costos CAPEX para la medida de energías renovables

Tipo central	Inversión (USD/kW)
Eólica	2,000
Solar	1,400
Hidroeléctrica	2,500
Ciclo combinado	1,400
Geotérmica	6,300
Tecnología diesel	1,300
Tecnología gas	1,300

Fuente: Elaboración propia con base en información del Comité Nacional de Despacho de Carga, la Autoridad de Electricidad, el Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (2014) y ENDE.

A partir de información del Plan Eléctrico Nacional Bolivia 2025 e información adicional obtenida del *National Renewable Energy Laboratory*, se elaboró el Cuadro 4, en el cual se pueden observar los costos de generación eléctrica según tipo de central.

Cuadro 4
Costos OPEX para la medida de energías renovables

Tipo central	O&M[3] fijo (USD/MW)	Comentario
Eólica	12	
Solar	1.6	
Hidroeléctrica	4.5	
Ciclo combinado	21	Equivale a 1.5% del costo de capital
Geotérmica	34	
Tecnología diesel	19.5	Equivale a 1.5% del costo de capital
Tecnología gas	19.5	Equivale a 1.5% del costo de capital

Fuente: Elaboración propia con base en información del Plan Eléctrico Nacional Bolivia 2025 y del *National Renewable Energy Laboratory.*

2.3.2. Cambio de alumbrado público a LED

Para los cuadros 5 y 6 se usó información del repositorio de la UMSA, específicamente de Ortuño (2016). Se buscaron datos sobre costos y consumo, tanto para luminaria LED como para luminaria de sodio, a fin de construir un cuadro comparativo.

Cuadro 5
Costos CAPEX para la medida de alumbrado público

Tipo de luminaria	Costo unitario (US$ por unidad)	Vida útil (años)
Luminaria LED (150 W)	450	10
Luminaria sodio (VNA 250W)	292.5	20

Fuente: Elaboración propia con base en información de la UMSA

3 Operación y mantenimiento

Cuadro 6
Costos OPEX para la medida de alumbrado público

Tipo de luminaria	Luminaria LED (150 W)	Luminaria sodio (VNA 250W)
Costo mantención (US$ por hora)	7.02	47.92
Frecuencia para la mantención (años)	4	3
Horas por luminaria (horas)	0,5	0.5
Otros costos (US$ por hora)	75	43.5
Frecuencia otros costos (años)	10	8
Horas por luminaria (horas)	0.5	0.5
Electricidad (US$/kWh)	0.14	0.14
Consumo (kWh/lámpara al año)	661	1,318

Fuente: Elaboración propia con base en información de la UMSA.

2.3.3. Electromovilidad

Se tomó como referencia información de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (2019), para establecer los costos de los vehículos eléctricos por tipo de modelo. En el caso de los costos de los vehículos convencionales, se usó información de *World Transportation*. A partir de esta información se establecieron los costos de capital para el parque automotor (Cuadro 7).

Cuadro 7
Costos CAPEX para la medida de electromovilidad

Tipo automóvil	CAPEX vehículo eléctrico	CAPEX vehículo convencional
Automóvil privado (US$ por unidad)	37,044	10,294
Taxi (US$ por unidad)	37,044	10,294
Trufi (US$ por unidad)	37,044	10,294
Camión (US$ por unidad)	40,000	30,882
Bus/Microbús (US$ por unidad)	480,000	320,000
Minibuses/furgón (US$ por unidad)	480,000	320,000

Fuente: Elaboración propia con base en Asociación Nacional Automotriz de Chile (2019) y *World Transportation*.

Con base en datos del Ministerio de Hidrocarburos y Energías (MHE, 2020) se pudo establecer la comparativa de costos operativos para cada tipo de vehículo (Cuadro 8). En el caso de los vehículos eléctricos, se estableció un costo universal, ya que todos funcionan con el mismo tipo de energía. Para los vehículos convencionales se usó un costo promedio de combustibles fósiles por litro.

Cuadro 8
Costos OPEX para la medida de electromovilidad

Tipo de vehículo	Costo electricidad (US$/kWh)	Costo combustible (US$/L)
Automóvil privado	0.117	0.54
Taxi	0.117	0.54
Trufi	0.117	0.54
Camión	0.117	0.54
Bus/microbús	0.117	0.54
Minibuses/furgón	0.117	0.54

Fuente: Elaboración propia con base en MHE (2020).

Finalmente, se establecen supuestos para la definición de los costos y construcción del modelo sectorial (Cuadro 9). Los datos que se utilizaron corresponden al MHE (2020) y representan los parámetros que permiten establecer los distintos costos para cada tipo de vehículo, con base en las tablas previas.

Cuadro 9
Parámetros adicionales para la medida de electromovilidad

Tipo vehículo	Combustible	Consumo combustible (L/km)	Consumo electricidad (kWh/km)	Distancia anual recorrida (km/año)
Automóvil privado	Gasolina	0.1	0.23	10,963
Taxi	Gasolina	0.1	0.23	47,821
Trufi	Gasolina	0.1	0.23	52,405
Camión	Diesel	0.25	1.26	33,910
Bus/microbús	Diesel	0.19	1.26	42,599
Minibuses/ furgón	Gasolina	0.11	1.26	53,116

Fuente: Elaboración propia con base en información del MHE (2020).

2.3.4. Ampliación de Mi Teleférico

A partir de información recopilada de Mi Teleférico se establecieron los costos de las líneas, sus longitudes y su capacidad (Cuadro 10). Luego se definió el costo por kilómetro construido y se obtuvo un costo promedio para todas las líneas.

Cuadro 10
Costos CAPEX para la medida de Mi Teleférico

Línea	Costo	Longitud	US$/km	Capacidad
	US$	Km		Pasajeros por hora
Roja	62,716,191	2.4	26,131,746	3,000
Amarilla	83,104,646	3.9	21,308,884	3,000
Verde	88,859,345	3.7	24,016,039	3,000
Azul	99,498,333	4.7	21,169,858	3,000
Naranja	72,726,333	2.6	27,971,667	3,000
Blanca	66,058,331	2.9	22,778,735	3,000
Celeste	88,004,433	2.7	32,594,235	4,000
Morada	95,304,697	4.3	22,163,883	4,000
Café	28,407,872	0.7	40,582,675	2,000
Plateada	56,556,500	2.6	21,752,500	3,000
Promedio			26,047,022	

Fuente: Elaboración propia con base en información de Mi Teleférico.

El Cuadro 11 presenta un resumen con toda la información sobre i) costos operativos y de funcionamiento, ii) cantidad promedio de pasajeros que dejan de usar transporte público para usar la red Mi Teleférico, y iii) cantidad de horas que opera la red de Mi Teleférico.

Cuadro 11
Costos OPEX para la medida Mi Teleférico

Variable	Valor
Costo Electricidad (US$/kWh)	0.14
Costo gasolina (US$/L)	0.54
Consumo electricidad (kWh/año-km)	324,590
Gasolina ahorrada (L/pasajero)	0.25
Pasajeros transportados (pasajeros/hora/dirección)	2,100
Horas operación (horas/año)	5,950

Fuente: Elaboración propia con base en información de Mi Teleférico, notas de prensa (Página Siete).

2.3.5. Implementación del Tren Metropolitano

Para el caso del Tren Metropolitano se consideró información de la empresa constructora Asociación Accidental Tunari, y adicionalmente se usó información sobre el costo de electricidad y de gasolina obtenidos en medidas previas. A partir de esta información se elaboró un resumen de los costos asociados al proyecto y de los costos de la reducción del consumo de combustibles fósiles, que pueden apreciarse en el Cuadro 12.

Cuadro 12
Costos para la medida de Tren Metropolitano

CAPEX	
Tipo	**Valor**
Tren Cochabamba (USD)	447,700,000
OPEX	
Variable	Valor
Costo electricidad (US$/kWh)	0.14
Costo gasolina (US$/L)	0.54
Consumo electricidad (kWh/año)	9,900,000
Gasolina ahorrada (L/pasajero)	0.25

Fuente: Elaboración propia con base en información reportada en prensa (Los Tiempos y Página Siete).

2.4. Costos de implementación de las medidas del sector forestal

Con base en el estudio de Espinoza, Malky y Bruner (2015), se calcularon las rentabilidades por hectárea de productos no maderables y maderables el año 2014. Por otro lado, y a partir de datos de la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra (ABT, 2016), se obtuvieron los porcentajes de participación de la superficie con aprovechamiento forestal correspondiente a la producción de los sectores maderable y no maderable. A partir de esos datos y aplicando un promedio ponderado en función a la superficie, se estimó el valor promedio de la producción forestal. Dicho valor fue ajustado por inflación hasta el año 2020, y se le añadió un ingreso por turismo en zonas de bosque de Bolivia[4]. El costo asociado a la línea-base es la pérdida de cobertura forestal anual total. Esta información se resume en el Cuadro 13.

4 El ingreso por turismo fue obtenido a partir de una proporción del ingreso del país por concepto de turismo, ponderado por la proporción de superficie forestal que se encuentra dentro de las áreas protegidas, asumiendo que el turismo de naturaleza se desarrolla principalmente al interior de estas áreas.

Cuadro 13
Costos para cálculo de línea-base del sector forestal

Variable	Valor
Rentabilidad de no maderables (Bs. por hectárea)	93.00
Rentabilidad de maderables (Bs. por hectárea)	1,387.00
Porcentaje de superficie que se someterá a producción forestal maderable en Bolivia	85.40%
Porcentaje de superficie que se someterá a producción forestal no maderable en Bolivia	14.60%
Rendimiento final producción forestal maderable y no maderable ponderada 2014 (Bs/Ha)	1,198.07
Rendimiento final producción forestal maderable y no maderable ponderada 2014 (US$/Ha)	172.14
Rendimiento final producción forestal maderable y no maderable ponderada 2020 (US$/Ha)	200.65
Ingreso por turismo en bosques en Bolivia (US$/Ha)	0.95
Costo de pérdida de cobertura forestal (US$/Ha)	201.60
Porcentaje de participación del CAPEX	10%

Fuente: Elaboración propia con base en Espinoza, Malky y Bruner (2015), Plan Estratégico Institucional ABT 2016-2020 (ABT, 2016), Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz, y banco de datos del Banco Mundial.

2.4.1. Deforestación ilegal

Se utilizó información del Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz (Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia, 2020). Este plan presenta información actualizada que toma en cuenta una zona geográfica relevante para estimaciones asociadas a la deforestación y el cambio de uso del suelo en Bolivia. Específicamente, se empleó el costo de restauración activa como un proxy del costo de la deforestación ilegal (bajo el enfoque de costos evitados). Adicionalmente, se asumió el porcentaje de participación de gastos de capital respecto al costo total, tomando como referencia el porcentaje promedio observado en aquellas medidas cuya distribución de costos está disponible. Esta información puede apreciarse en el Cuadro 14.

Cuadro 14
Costos para la medida de deforestación ilegal

Variable	Valor
Costo de conservación activa de municipios (Bs)	20,000,000
Hectáreas bajo proceso de conservación activa (Ha)	8,000
Costo de conservación activa por hectárea (Bs por Ha)	2,500
Costo de conservación activa por hectárea (US$ por Ha)	359.20
Porcentaje de participación del CAPEX	10%

Fuente: Elaboración propia con base en información del Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz.

2.4.2. Gestión comunitaria MIB

Se incluyó una prima adicional por MIB de 100 Bs por Ha, de acuerdo con Espinoza, Malky y Bruner (2015). A partir de esa prima adicional se hicieron los cálculos específicos para establecer los costos asociados a esta medida. También se estableció un porcentaje promedio para la participación del CAPEX respecto al costo total. Esta información está detallada en el Cuadro 15.

Cuadro 15
Costos para la medida de gestión comunitaria MIB

Variable	Valor
Costo de conservación activa de municipios (Bs)	20,000,000
Hectáreas bajo proceso de conservación activa (Ha)	8,000
Costo de conservación activa por hectárea (Bs por Ha)	2,500
Prima adicional por conservación con MIB (Bs por Ha)	100
Costo de gestión comunitaria con MIB (Bs por Ha)	2,600
Costo de conservación activa por hectárea (US$ por Ha)	373.56
Porcentaje de participación del CAPEX	20%

Fuente: Elaboración propia con base en información del Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz.

2.4.3. Producción forestal maderable y no maderable

Se usaron datos de Espinoza, Malky y Bruner (2015) sobre la rentabilidad de la agricultura para el año 2014. Este valor fue ajustado por inflación para encontrar el valor correspondiente al año 2020. Se estimó la diferencia entre la rentabilidad de la agricultura y la rentabilidad de

producción forestal y turismo, estimada en el cálculo de línea-base. La diferencia representa el costo de la medida, asumiendo que, en las condiciones actuales, el cambio de producción agrícola a forestal y turismo representa una pérdida de ingresos. Esta información se presenta en el Cuadro 16.

Cuadro 16
Costos para la medida de producción forestal

Variable	Valor
Rentabilidad de la agricultura el año 2014 (Bs por hectárea)	4,267.00
Rentabilidad de la agricultura el año 2020 (Bs por hectárea)	4,973.88
Rentabilidad de la agricultura el año 2020 (US$ por hectárea)	714.64
Rentabilidad de la producción forestal y el turismo (US$ por hectárea)	201.60
Pérdida de ingreso por producción forestal y turismo (US$ por hectárea)	513.04
Porcentaje de participación del CAPEX	20%

Fuente: Elaboración propia con base en Espinoza, Malky y Bruner (2015), Plan Estratégico Institucional ABT 2016-2020 (2016), Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz, y banco de datos del Banco Mundial.

2.4.4. Incendios forestales

Se utilizó la misma información de costos empleada para la medida de deforestación ilegal (Cuadro 14), debido a que la medida asociada a incendios estimó la reducción de emisiones a partir de la deforestación asociada al cambio de uso de suelos promovido por los incendios, y no así a las emisiones ocasionadas por la combustión de la vegetación. Este supuesto significa una subestimación de las emisiones totales del sector forestal. Sin embargo, fue necesario asumirlo debido a la limitada información existente sobre emisiones generadas por fuegos.

2.4.5. Incremento de la superficie forestal

Se utilizaron datos del Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz para el costo promedio de un plantín (Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia, 2020). Posteriormente, se emplearon los datos de Ter Steege *et al.* (2013) para estimar la cantidad de árboles promedio que existen en la Amazonia,[5] por

5 Se utilizó información para la Amazonia por ser el único ecosistema con información suficiente sobre la cantidad de árboles por hectárea, respecto al resto de ecosistemas de Bolivia. Además, es el ecosistema con mayor capacidad de absorción y almacenamiento de CO2eq del país, y el que ocupa mayor superficie entre los ecosistemas de bosques.

hectárea. Se multiplicaron estos valores y se obtuvo el costo de plantar una hectárea en la Amazonia.

Cuadro 17
Costos para la medida de incremento de la superficie forestal

Variable	Valor
Plantines que se plantaran como parte de la reforestación en Santa Cruz (cantidad de plantines)	530,000
Presupuesto para el plantado de plantines en Santa Cruz (Bs)	8,000,000.00
Costo unitario del plantín (Bs por plantín)	15.09
Cantidad de árboles en una hectárea en la Amazonia (cantidad de árboles)	565
Costo de plantines por hectárea (Bs por Ha)	8,528.30
Costo de plantines por hectárea (US$ por Ha)	1,225.33
Porcentaje de participación del CAPEX	25%

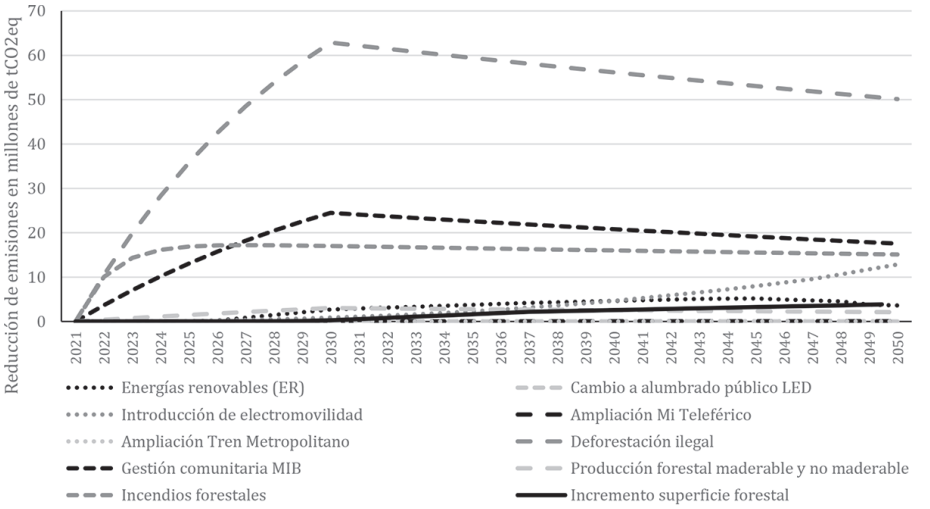
Fuente: Elaboración propia con base en el Plan de Recuperación de Zonas Afectadas por Incendios en el Departamento de Santa Cruz.

3. Resultados

3.1. Capacidad de mitigación de las medidas

Tomando como referencia las metas establecidas para cada medida y los montos de emisiones de la línea-base, se logró establecer la capacidad de mitigación de cada una de las medidas, representadas en el Gráfico 4.

Gráfico 4: Capacidad de mitigación de las medidas

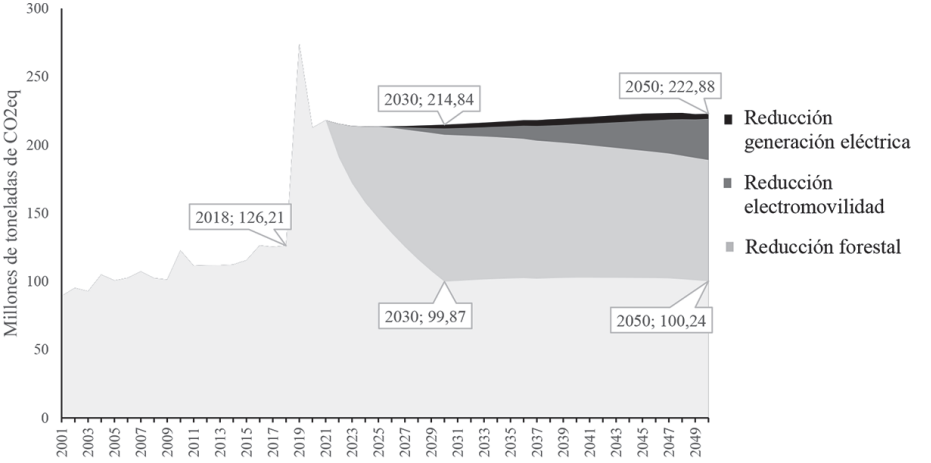


Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

La mayor capacidad de reducción de emisiones viene dada principalmente por las medidas del sector forestal (reducción de la deforestación ilegal, reducción de incendios forestales y la gestión comunitaria para el manejo integral de bosques).

De la misma manera, el Gráfico 5 presenta la reducción agregada en emisiones respecto a las emisiones estimadas en la línea-base y según sector (desagregando el sector energético en generación eléctrica y transporte).

Gráfico 5: Capacidad de mitigación de las medidas respecto a línea-base por sector



Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

Las medidas del sector forestal son las que tienen un mayor impacto en la reducción de emisiones totales (aproximadamente un 72.42%), seguido por el sector de transporte (aproximadamente un 24.65%) y, finalmente, el sector de generación eléctrica, que tiene el menor impacto de los tres sectores (2.93%).

3.1.1. Costo-eficiencia (capacidad de abatimiento)

A partir de la capacidad de mitigación de emisiones de CO2eq de las medidas y los costos asociados a la implementación de cada una de ellas, se estimó el costo de abatimiento, el cual mide el costo de cada medida respecto a una tonelada de CO2eq.

Cuadro 18
Costos de abatimiento

Medida	Emisiones al 2050	Costo de abatimiento al 2050
	Millones de tCO2eq	US$/tCO2eq
Alumbrado	-0.08	-836.05
Electromovilidad	-115.72	-59.16
Producción forestal maderable y no maderable	-66.37	-16.45
Incendios forestales	-462.68	-2.04
Gestión comunitaria MIB	-549.53	-1.66
Deforestación ilegal	-1479.90	-0.39
Energías renovables	-92.01	0.09
Mi Teleférico	-219.03	0.60
Incremento superficie forestal	-50.40	17.50
Tren Metropolitano	-0.56	10,409.94

Fuente: Elaboración propia.

Se pueden identificar tres grupos de medidas. Aquéllas que tienen un gran potencial de mitigación y un costo muy bajo (o ahorro), como evitar la deforestación ilegal, promover la gestión comunitaria MIB y limitar los incendios forestales; las medidas que son muy costosas y que tienen muy pocas reducciones de emisiones, como el tren metropolitano; y finalmente, las medidas que se logran con significativo ahorro y que además reducen emisiones, entre ellas, el alumbrado público y la electromovilidad.

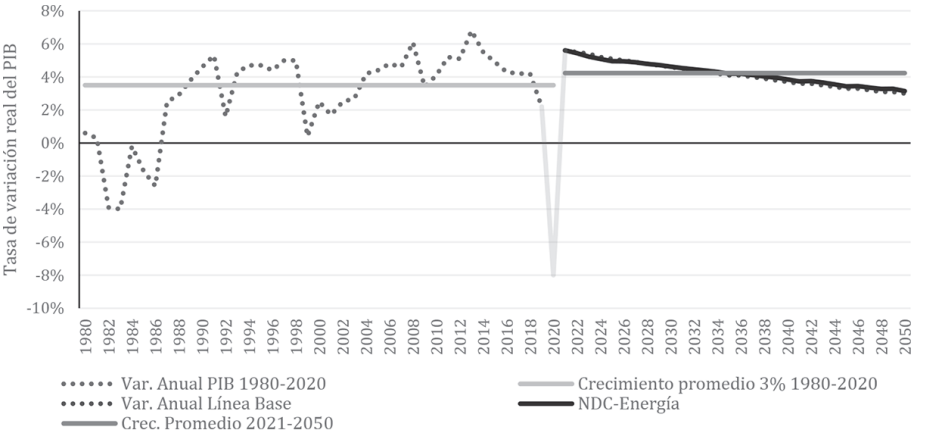
3.2. Impacto económico de las medidas de mitigación

Una vez analizadas las medidas en los distintos sectores y estimadas sus capacidades en términos de reducción de emisiones y costos de inversión y operación, es importante entender cómo es el comportamiento de la tasa de crecimiento histórica y esperada para el período de análisis (2022 a 2050).

En el Gráfico 6 se pueden analizar tres etapas de la historia económica de Bolivia. La primera, entre los años 1990 y 2019, con el comportamiento de la tasa de crecimiento del producto en torno al 3.5%; la segunda entre 2019 y 2020, caracterizada por la crisis sanitaria a escala global con consecuencias muy fuertes para la economía global, y con un impacto

para Bolivia que significó la pérdida de hasta un 8% de su producto; y finalmente, la tercera etapa, representada por el comportamiento de la economía hasta el año 2050, con una tasa de crecimiento promedio anual de 4%. Esta etapa se construyó en consideración a las medidas y supuestos descritos anteriormente.

Gráfico 6: Crecimiento del PIB histórico y proyectado, con y sin implementación de medidas



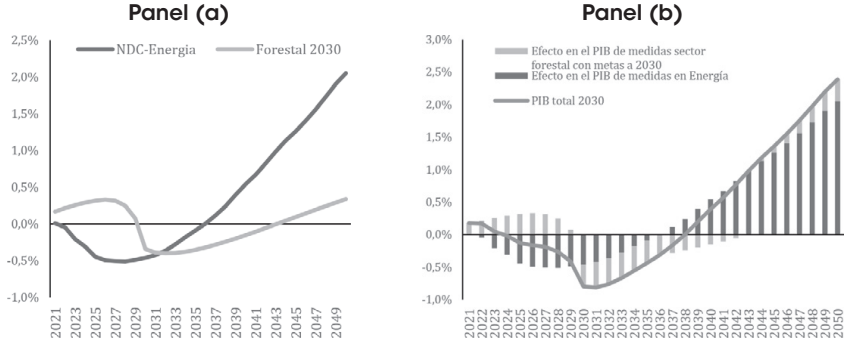
Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

Utilizando el modelo macroeconómico de equilibrio general dinámico y estocástico, descrito en el Anexo metodológico y desarrollado en Antosiewicz y Gonzáles (2021), para la evaluación de medidas de mitigación para el cambio climático, se puede apreciar que la tasa de crecimiento esperada, en un escenario con medidas, es marginalmente superior a la tasa de crecimiento esperada en un escenario sin implementación de medidas (escenario-base). No obstante, la ganancia asociada a la implementación de medidas en términos de reducción de emisiones es significativa (hasta el 40% de las emisiones de CO2eq).

Si se compara el crecimiento del nivel del producto con respecto al de la línea-base, el año 2050 la economía aumentaría su tamaño en torno al 2.4%. Este resultado se compone de dos etapas, la primera en que el producto se ve afectado en 0.5%, en promedio, debido al proceso de adaptación y transición hacia un nuevo modelo y, la segunda etapa, donde se observa ganancia en la producción que impulsa el crecimiento hasta el final del periodo de análisis. Para entender el efecto de las medidas en los sectores de energía y forestal, en el total

del producto, se puede descomponer el efecto del paquete de medidas y su contribución en las variaciones del producto según sector, como se observa en el Gráfico 7.

Gráfico 7: Efecto de medidas en los sectores de energía y forestal sobre el producto



Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

En el panel (a) se observa que los efectos del paquete forestal tienen dos momentos. Primero, se observan contribuciones positivas en el producto con respecto a la línea-base y, posteriormente, para alcanzar la meta de deforestación ilegal igual a cero, se requiere un esfuerzo que impacta negativamente en el nivel del producto durante aproximadamente una década. Asimismo, existe un esfuerzo por la reconversión en el sector energético, principalmente proveniente de la electromovilidad. Este período de esfuerzo por la reconversión culmina en 2035, cuando los costos operativos empiezan a ser menores que en el escenario sin medidas y, por lo tanto, se empiezan a observar las ganancias en el producto por la implementación de las medidas. Estas dinámicas pueden apreciarse también en el panel (b), donde existe una variación del valor agregado, año tras año, para ambos paquetes de medidas.

En relación al aporte adicional que recibe la economía por las intervenciones (implementación de las medidas en ambos sectores), se estima una contribución adicional total de US$15,000 millones de dólares (en valor presente neto). Esto representa una ganancia de alrededor de US$ 500 millones adicionales por año, para el período de análisis.

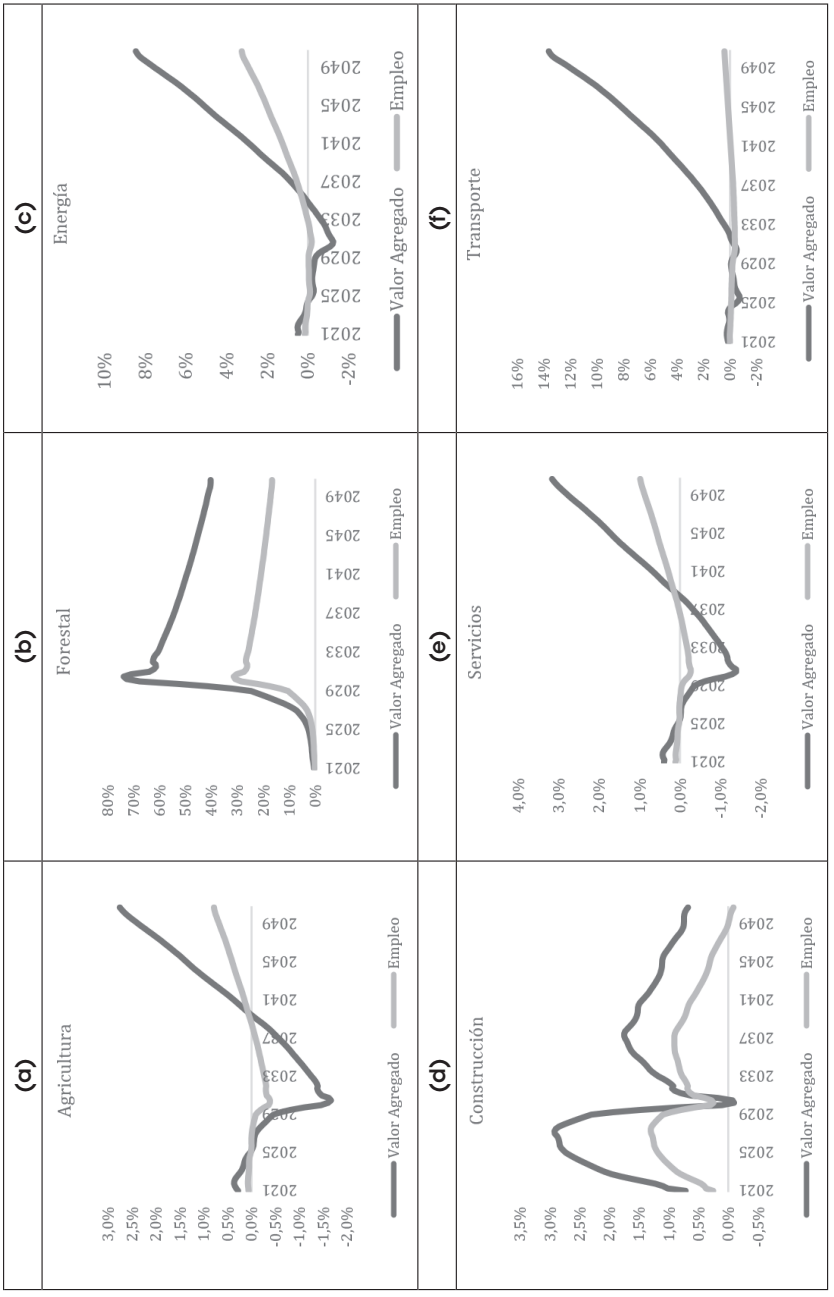
Otra forma de analizar el impacto de estas medidas es observando su efecto en el empleo. Dadas las relaciones intersectoriales, la implementación de medidas en los sectores analizados produce un impacto en la generación de empleo en otros sectores, algunos de los cuales tienen

bajos niveles de ocupación laboral en la actualidad, como es el caso del sector forestal. De esta manera, y aprovechando la riqueza del modelo, fue posible observar el efecto de las medidas para otros sectores representativos de la economía.

El sector de agricultura, descrito en el panel (a) del Gráfico 8, muestra el comportamiento esperado ante las medidas de eliminación de deforestación hasta el año 2030. Se observa un periodo de adaptación con un impacto negativo en el sector, debido a que existe una competencia en el uso del suelo entre el sector forestal y el agrícola. Luego de ese período de adaptación, las ganancias en productividad producen una recuperación y se registra un incremento en el valor agregado del sector. Es importante mencionar que esta proyección no considera mejoras de productividad que permitan al sector agropecuario incrementar su producción sin necesidad de que se amplíe la frontera agropecuaria. La incorporación de mejoras productivas y tecnológicas reduciría la relación de dependencia entre el crecimiento sectorial y el incremento de frontera agrícola y, por tanto, reduciría el costo generado por las medidas de reducción de deforestación.

En los paneles (b), (c) y (f) se muestran los sectores en los cuales principalmente se realizan las inversiones de las medidas de mitigación, los cuales son el forestal, el de energía y el de transporte, respectivamente. Se destaca que el impacto sobre el sector forestal es significativo debido a que la intervención aumenta en 70% su valor agregado en comparación al escenario-base (donde tiene una participación muy modesta en la economía). En el sector energía se observa el proceso de transformación de la matriz de generación hasta el año 2030 y, posteriormente, una tendencia creciente por el resto del período, como consecuencia de las ganancias generadas por los menores costos de operación, en comparación con la línea-base. En cuanto al transporte, el recambio del parque automotor provoca un aumento del valor agregado; sin embargo, a diferencia de los otros dos sectores, las ganancias en empleo son menores, ya que las medidas son intensivas en capital, principalmente. Finalmente, los paneles (d) y (e) muestran las dinámicas de dos sectores, construcción y servicios, que otorgan insumos productivos al resto de los sectores.

Gráfico 8: Comportamiento de los sectores con aplicación de medidas

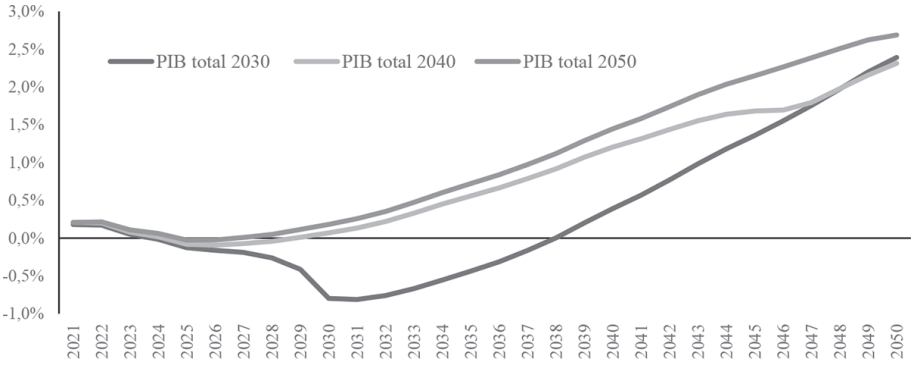


Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

3.3. Sensibilidad de implementación de medidas de mitigación

Una de las medidas más importantes en términos de emisiones de CO2eq es la reducción de la deforestación ilegal. Considerando las implicancias que puede tener esta medida, se decidió construir escenarios alternativos para la misma, los cuales evalúan cuáles serían las consecuencias de postergar la meta de reducción de deforestación por una o dos décadas (Gráfico 9). Esta demora puede darse por decisión política, por un retraso en la implementación de la medida, o simplemente porque su implementación puede enfrentar dificultades. El primer indicador de interés es el efecto en el producto; en este caso, se pudo constatar que, de postergarse la medida hasta el año 2050, se obtendría cerca de 2.7% de ganancia adicional en el producto, con beneficios observados durante todo el periodo de análisis. En el caso de postergar por una sola década, el resultado es el mismo que en la medida 2030 (en torno a 2.4%) pero existen mayores emisiones de CO2 y mayor afectación a la superficie deforestada.

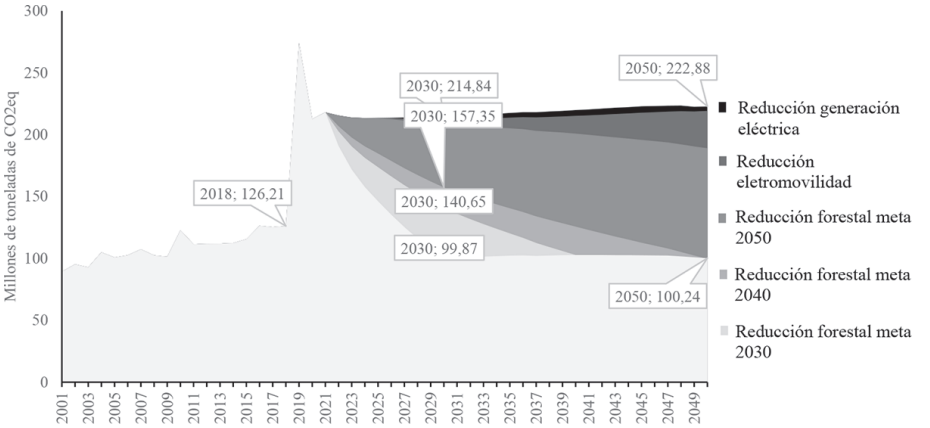
Gráfico 9: Comportamiento del PIB con aplicación de medidas el año 2050



Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

Si los esfuerzos para alcanzar las metas de deforestación son postergados hasta el año 2050, el costo financiero de implementación se retrasaría, pero el costo en términos de emisiones superaría las 830 millones de tnCO2e emitidas. Esto se encuentra en el Gráfico 10, donde se observa la reducción de emisiones totales de Bolivia, y se evidencia el impacto de postergación del cumplimiento de la meta. El resultado de la sensibilización muestra que la ganancia en el producto es positiva, sólo a causa de la inacción de la medida (postergación de la reducción de la deforestación ilegal).

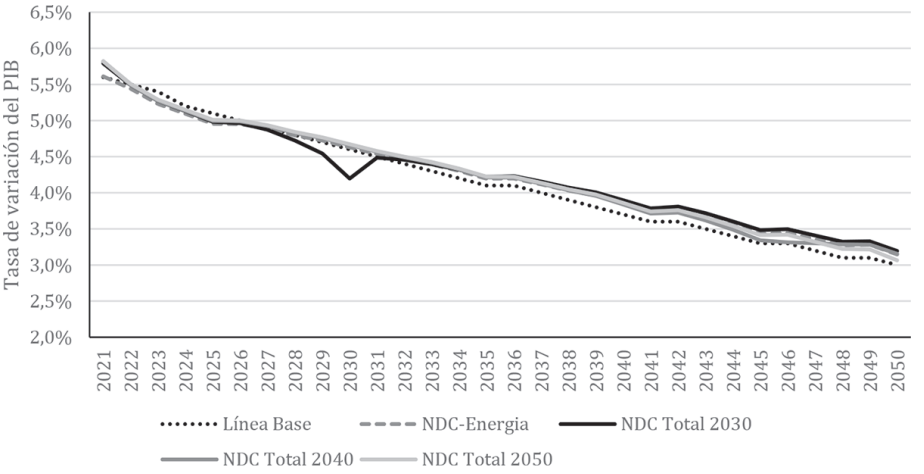
Gráfico 10: Efectos de la aplicación de medidas sobre las emisiones



Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

Finalmente, en el Gráfico 11 se encuentran las dinámicas en la tasa de variación anual del PIB entre el escenario sin medidas y los escenarios con las medidas sectoriales. La figura muestra las ganancias en tasa de crecimiento de las distintas medidas de los sectores de energía y forestal. En el caso del sector forestal, desagregado según los escenarios de sensibilización que se construyeron para la meta de reducción de deforestación ilegal. Como se mencionó anteriormente, postergar el costo de eliminar la deforestación ilegal (hasta 2040 o 2050), permite obtener ganancias en el producto que no son significativamente diferentes de alcanzar la meta hasta el 2030. Sin embargo, la diferencia en cuanto a la reducción de emisiones es significativa.

Gráfico 11: Tasas de variación anual



Fuente: Elaboración propia con base en modelos de estimación.

4. Discusión y conclusiones

La implementación de las medidas de mitigación de emisiones de CO2eq en los sectores de energía y forestal, propuestas en las NDC de Bolivia, permitirían que el país contribuya con una reducción del 40% de sus emisiones hasta el año 2050. Este objetivo se alcanzaría sin que se tenga que sacrificar el crecimiento de la economía, dado que las proyecciones de crecimiento en un escenario con medidas, serían 2.7% mayores respecto a las que se obtendrían sin la implementación de éstas (escenario-base).

Este resultado se da por varias razones, entre ellas: i) las medidas con mayor capacidad de reducción de emisiones son altamente eficientes en términos del costo asociado a su implementación (es el caso de medidas como la reducción de la deforestación ilegal, la reducción de incendios y la transición hacia modelos de generación energética más limpia), ii) los saltos tecnológicos observados en los últimos años redujeron significativamente el costo de generación energética y del transporte basado en electromovilidad, incrementando significativamente la competitividad de estas alternativas frente a los sistemas de generación eléctrica y transporte tradicionales, y iii) si bien la implementación de las medidas demandará esfuerzos de reconversión y un período de adaptación, especialmente para el sector forestal, el

efecto neto a largo plazo y para toda la economía será positivo, especialmente por el impacto que tendrán las inversiones en sectores intensivos en capital como son los sectores de energía y transporte.

El proceso de transición hacia modelos más eficientes en términos de emisiones, tanto en el sector energético como forestal, requiere obtener un flujo de financiamiento que garantice la implementación de las medidas. El conjunto de medidas analizadas demandaría una inversión (descontada a valor presente) equivalente al 30% del PIB (US$ 12,000 millones, con base en el valor de 2021). Dado ese nivel de inversión, y considerando las dificultades que tendría Bolivia para solventarla con recursos propios, es importante complementar las fuentes de financiamiento interno con fuentes externas provenientes de fondos climáticos y de la cooperación internacional. Adicionalmente al financiamiento, será indispensable garantizar los esfuerzos de implementación de manera consistente, año tras año, hasta 2050. La identificación de las posibles fuentes de financiamiento y el costo de éste son aspectos que no son abordados por este análisis, pero que deben ser priorizados en la agenda de investigación futura.

A partir de un análisis de sensibilidad en el sector forestal, se observó que la postergación de la implementación de medidas hasta los años 2040 y 2050 conlleva una generación de emisiones adicionales. Postergar las medidas hasta el año 2040 implicaría la emisión de más de 600 millones de toneladas de CO2eq adicionales. Si las medidas se retrasan hasta el año 2050, se generarían más de 830 millones de toneladas de CO2eq adicionales. En ambos casos, el impacto sobre el producto sería de un incremento de 2.4% y 2.7% respectivamente.

Cabe mencionar que estas estimaciones están expuestas a cambios que pueden mejorar su rentabilidad, o empeorarla, en función al desarrollo tecnológico que se presente. Un ejemplo de esta incertidumbre fue observado en la evolución del costo de la tecnología de generación energética a partir de plantas solares, la cual tuvo una caída en el costo por mega watt instalado de cerca al 63% entre 2000 y 2015,[6] hecho que provoca una mayor rentabilidad en muchos proyectos que no podrían haberse realizado bajo las condiciones previas. De igual manera, condiciones de desequilibrios en los mercados, como la permanencia de incentivos

6 Our world in data, https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-system-costs?country=~USA

que distorsionan el consumo de combustibles fósiles, afectan significativamente los precios y, por tanto, el comportamiento de los mercados en el periodo de análisis.

Otros cambios tecnológicos que podrían alterar significativamente los resultados son aquéllos que podrían darse en el sector agropecuario. Mejoras en la productividad asociadas a nuevas tecnologías y a modelos de agricultura y ganadería sostenibles permitirían reducir la presión sobre los bosques (menor necesidad de ampliar la frontera agrícola) y, por tanto, reducirían el costo asociado a implementar las medidas consideradas para el sector forestal. Es decir, permitiría suavizar el impacto en el período de adaptación y transformación sectorial y, además, alcanzar mejores resultados en términos de las ganancias económicas. Cuantificar el impacto de este tipo de medidas es otra tarea pendiente que podría complementar los resultados de este análisis y ofrecer información relevante para el diseño de políticas.

Finalmente, otro aspecto a considerar es que los resultados esperados en términos del comportamiento económico y la capacidad de reducción de emisiones dependen, en gran magnitud, del nivel de eficiencia institucional, tanto pública como privada. Ese nivel de eficiencia determinaría variaciones en los costos de implementación de las medidas, así como en el cumplimiento de los plazos propuestos para las mismas. En este sentido, es importante ver la experiencia internacional en países donde este tipo de medidas ya se implementaron o se vienen implementando, y tomar lecciones aprendidas.

Fecha de recepción: 2 de febrero de 2022
Fecha de aceptación: 25 de abril de 2022
Manejado por ABCE/SEBOL/IISEC

Referencias

1. Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra [ABT] (2016). *Plan Estratégico Institucional 2016-2020.*
2. Antosiewicz, M., Gonzales, L. E., Lewandowski, P. y de la Maza, N. (2020). *Green Growth Opportunities for the Decarbonization Goal for Chile: Report on the Macroeconomic Effects of Implementing Climate Change Mitigation Policies in Chile 2020*. World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34575
3. Antosiewicz, M. y Gonzales, L. (2021) *Macroeconomic model for the assessment of mitigation policies in Bolivia*, Mimeo.
4. Antosiewicz, M. y Kowal, P. (2016). *MEMO III - A large scale multi-sector DSGE model.* (IBS Research Report 02/2016). http://ibs.org.pl/en/publications/memo-iii-a-large-scale-dsge-model/
5. Anwar, A. (2001). *Does the Age of a Tree Effect Carbon Storage*. NASA. https://icp.giss.nasa.gov/research/ppa/2001/anwar/
6. Asociación Nacional Automotriz de Chile (2019). *Informe del mercado automotor*. ANAC.
7. Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra (2020). *Tercera Comunicación Nacional del Estado Plurinacional de Bolivia.* Gobierno Nacional de Bolivia.
8. Cámara Forestal de Bolivia (2021, 17 de junio). Perspectivas de la actividad forestal en Bolivia. https://www.cfb.org.bo/noticias/noticias/normativa/perspectivas-de-la-actividad-forestal-en-bolivia.html
9. Climate Watch (2021). *Greenhouse Gas Emissions and Emissions Targets.* https://www.climatewatchdata.org/countries/BOL?end_year=2018&start_year=1990
10. Espinoza, S., Malky, A. y Bruner, A. (2015). *Análisis de costos del Programa COMSERBO-Pando Bolivia*. (CSF Serie Técnica N° 43).
11. Fundación Amigos de la Naturaleza [FAN] (2019). Incendios forestales en Bolivia 2019-2020.https://incendios.fan-bo.org/Satrifo/incendios-forestales-en-bolivia-2019-2020/
12. Fundación Amigos de la Naturaleza [FAN] y Wildlife Conservation Society [WCS]. (2021). *Incendios forestales en Bolivia. Análisis de impactos de los incendios forestales sobre los valores de conservación en Bolivia, 2020*. Fundación Amigos de la Naturaleza.
13. FAOSTAT. https://www.fao.org/faostat/es/

14. Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia (2020). *Plan de recuperación de zonas afectadas por incendios en el departamento de Santa Cruz*. Gobernación de Santa Cruz.

15. Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia (2018). *Deforestación en el Estado Plurinacional de Bolivia. Periodo 2016-2017*. Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra.

16. Global Forest Watch (2021). *Pérdida de cobertura arbórea 2001-2020*. https://www.globalforestwatch.org/map/?map=eyJjZW50ZXIiOnsibGF0IjotNC45NTI4NTAwMzc4ODc1MTIsImxuZyI6LTcwLjc5Mjk2ODc1MDAwMTY4fX0%3D

17. IPCC (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926

18. Malky, A., Ledezma, J.C., Vilela, T. y Mendizábal, C. (2021). *Contribución de las áreas protegidas nacionales de Bolivia en la provisión de funciones ambientales: descripción metodológica y materiales complementarios*. Conservation Strategy Fund.

19. Ministerio de Hidrocarburos y Energías [MHE]. (2020). *Plan para el desarrollo de energías alternativas en Bolivia.* Ministerio de Hidrocarburos y Energías.

20. National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/research/data-tools.html

21. Ortuño, A. (2016). *Estudio técnico, económico y social del sistema de alumbrado público con tecnología LED en la ciudad de La Paz*. Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).

22. Sanquetta, C., Dalla, A., Libanio, A., Tomé, M., Benedet, G. e Inoue, M. (2018). Dynamics of carbon and CO2 removals by Brazilian forest plantations during 1990-2016. *Carbon Balance Management, 13*. https://doi.org/10.1186/s13021-018-0106-4

23. Pellegrini, A. F. A., Refsland, T., Averill, C., … y Jackson, R.B. (2021). Decadal changes in fire frequencies shift tree communities and functional traits. *Nature Ecology & Evolution, 5*, 504–512. https://doi.org/10.1038/s41559-021-01401-7

24. Ter Steege, H., Pitman, N., Sabatier, D., Baraloto, C., … & Silman, M.R. (2013). Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. *Science, 342*(6156). https://doi.org/10.1126/science.1243092

25. Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (2014). *Plan eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia 2025*. Ministerio de Hidrocarburos y Energía.

26. World Resources Institute (2014). *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories*. World Resources Institute.

Anexo metodológico

Modelos econométricos y de equilibrio general dinámico y estocástico

Este Anexo describe dos tipos de modelos: 1) los modelos econométricos empleados para la estimación de los CAPEX y OPEX de cada una de las medidas descritas en las secciones 2.2 a 2.4, y 2) las implicancias en los resultados de la sección 3, junto a los impactos económicos observados en el modelo de equilibrio general dinámico y estocástico, los cuales tienen como insumo las medidas de los modelos econométricos.

Modelos econométricos. Descripción del modelo del sector energético

Se usó un modelo autorregresivo con coeficiente de corrección de error. La variable dependiente corresponde al logaritmo de las emisiones de CO2eq *per cápita* en el sector energético. Las variables independientes son el logaritmo del uso de energía *per cápita*, el logaritmo del PIB *per cápita* y el logaritmo del uso de energía alternativa *per cápita*. Adicionalmente, se añadió una tendencia con el año al modelo. Los resultados del modelo se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro A1
Resultados del modelo del sector energético

Variables	(1)	(2)	(3)
	ADJ	LR	SR
LD. Emisiones CO2eq			-0.345***
			(0.124)
D. Uso de energía			0.771***
			(0.0932)
LD. Uso de energía			0.551***
			(0.145)
D.PIB			0.397***
			(0.117)
D. Uso de energía alternativa			0.00979
			(0.0809)
LD. Uso de energía alternativa			0.282***
			(0.0962)

L2D. Uso de energía alternativa			0.251***
			(0.0785)
Año			0.0113***
			(0.00163)
L. Uso de energía		-0.557*	
		(0.303)	
L.PIB		1.030***	
		(0.234)	
L. Uso de energía alternativa		-0.927***	
		(0.229)	
L. Emisiones CO2eq	-0.386***		
	(0.0813)		
Constante			-23.34***
			(3.089)
Observaciones	40	40	40
R-cuadrado	0.905	0.905	0.905

Errores estándar en paréntesis
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1
Fuente: Elaboración propia con base en el modelo estimado.

Descripción del modelo del sector forestal

Para el sector forestal se usó un modelo que tiene como base a la ecuación de acumulación de capital. Con base en los principios de esa ecuación, se pudo simular la dinámica del sector forestal expresado en la siguiente ecuación:

$$CF_t = CF_{t-1}\left(1 - tr\right) + CF_{t-1} * tp \qquad (1)$$

Donde:

CF_t = Cobertura forestal en el periodo t
$CF_{t\text{-}1}$ = Cobertura forestal en el periodo t-1
tp = Tasa de pérdida de cobertura forestal
tr = Tasa de regeneración de cobertura forestal

La ecuación (1) captura la dinámica de pérdida de cobertura forestal y también la regeneración que existe dentro del bosque. El resultado de esta ecuación es la cobertura forestal estimada para cada año, a partir de la cual se estiman las emisiones y capturas del sector forestal:

$$RCO2eq_t = fcf * CF_t \quad (2)$$

Donde:

$RCO2eq_t$ = Removal de $CO2eq$ en el periodo t
fcf = La fracción de removal por hectárea de cobertura forestal

Con la ecuación (2) se obtiene el valor de captura que tienen los bosques en un determinado periodo. El valor de la *fcf* se obtiene de Malky *et al.* (2021), donde se usaron imágenes satelitales para calcular el valor de captura que existe en la cobertura forestal en Bolivia. De la misma manera, se realizó una desagregación de la ecuación (2) por grupos etarios para poder observar la dinámica que existe con la captura adicional del bosque:

$$RCO2eq_t = CFG1_t * fcfg1 + CFG2_t * fcfg2 \quad (3)$$

Donde:

$RCO2eq_t$ = Removals de $CO2eq$ totales en el tiempo t
$CFG1_t$ = Cobertura forestal grupo 1 en el tiempo t
$CFG2_t$ = Cobertura forestal grupo 2 en el tiempo t
$fcfg1$ = La fracción de removal por hectárea del grupo 1
$fcfg2$ = La fracción de removal por hectárea del grupo 2

La ecuación (3) incluye la desagregación por grupos etarios, donde el grupo 1 está compuesto por bosques menores a 7 años y el grupo 2 corresponde al resto de la cobertura boscosa. Dicha división de edades se encuentra propuesta en Sanquetta *et al.* (2018), y lo que busca es capturar el efecto del incremento de absorción de los bosques más jóvenes frente a los maduros. El incremento de la fracción de *removal* usado es de 1.9, el cual se obtiene de Anwar

(2001). Para facilitar la modelación y el efecto de las medidas, se realizó una desagregación a la ecuación (2) por tipo de cobertura forestal:

$$RCO2eqT_t = RCO2eqAPN_t + RCO2eqAPSN_t + RCO2eqNOAP_t \quad (4)$$

Donde:

$RCO2eqT_t$ = Removals de CO2eq totales en el tiempo t
$RCO2eqAPN_t$ = Removals de CO2eq en Áreas Protegidas Nacionales en el tiempo t
$RCO2eqAPSN_t$ = Removals de CO2eq en Áreas Protegidas Subnacionales en el tiempo t
$RCO2eqNOAP_t$ = Removals de CO2eq en superficie boscosa que no se encuentra en áreas protegidas

Con la ecuación (4) se obtiene un valor de *removal* por cada tipo de superficie boscosa. En el estudio se realiza una división en tres grupos considerados de importancia, y las medidas que afectan a cada uno: áreas protegidas nacionales, áreas protegidas subnacionales y superficie boscosa que no se encuentra dentro de las áreas protegidas. Cada uno de estos grupos tiene su propio *removal* en función de la ecuación (3).

Después de obtener el dato de emisiones generadas por el *removal,* se plantea una ecuación que permita obtener las emisiones generadas por cambio de uso de suelo:

$$ECO2eq_t = fpc * PC_t \quad (5)$$

Donde:

$ECO2eq_t$ = Emisiones de CO2eq en el periodo t
fpc = La fracción de pérdida de carbono por hectárea
PC_t = Pérdida de cobertura forestal en el periodo t

Con la ecuación (5) se podrá determinar las emisiones generadas por cambio de uso de suelo. La *fpc* fue calculada a partir de información de World Resources Institute y Global Forest Watch. Usando datos históricos, se encontró un valor de 316.38 toneladas de CO2eq por hectárea perdida de cobertura forestal. Al igual que con la ecuación (3), se hizo una desagregación por tipo de superficie boscosa, para facilitar el análisis y el efecto de las medidas:

$$ECO2Teq_t = ECO2eqAPN_t + ECO2eqAPSN_t + ECO2eqNOAP_t \quad (6)$$

Donde:

$ECO2eqT_t$ = Emisiones de CO2eq totales en el tiempo t
$ECO2eqAPN_t$ = Emisiones de CO2eq en Áreas Protegidas Nacionales en el tiempo t
$ECO2eqAPSN_t$ = Emisiones de CO2eq en Áreas Protegidas Subnacionales en el tiempo t
$ECO2eqNOAP_t$ = Emisiones de CO2eq en superficie boscosa que no se encuentra en áreas protegidas

Con la ecuación (6) se obtiene el valor total de las emisiones por cambio de uso de suelo en el sector forestal. Con esta información se procede a combinar las ecuaciones (4) y (6) para obtener el resultado neto de las emisiones del sector forestal. Se tiene así la siguiente ecuación:

$$RNCO2eq_t = RCO2Teq_t + ECO2Teq_t \quad (7)$$

Donde:

$RNCO2eqT_t$ = Resultado neto de emisiones de CO2eq totales en el tiempo t
$RCO2Teq_t$ = Removal de CO2eq totales en el tiempo t
$ECO2Teq_t$ = Emisiones de CO2eq totales en el tiempo t

De esta manera, se logra obtener el total de emisiones generadas de CO2eq para cada año en función al resultado de la ecuación (7).

Modelo de equilibrio general dinámico y estocástico

Descripción del modelo macroeconómico

Para la evaluación del paquete de políticas se utilizó el modelo MEMO de equilibrio general estocástico dinámico, desarrollado en el Instituto de Investigaciones Estructurales (IBS, por su sigla en inglés) y especificado para la economía boliviana en el documento Antosiewicz y Gonzales (2021).

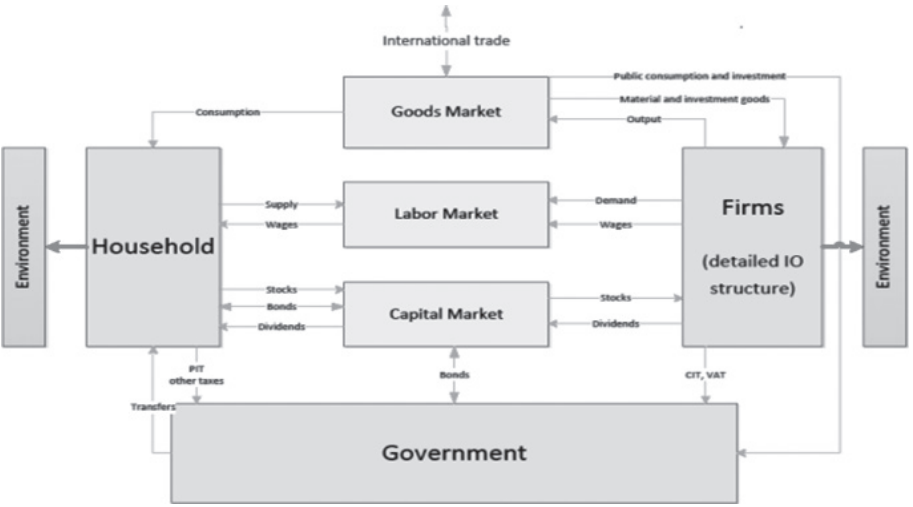
En el gráfico 1 se muestra una descripción general de la estructura del modelo y sus elementos principales. El modelo combina dos líneas de investigación: entrada-salida y modelos de equilibrio general. Las principales características del modelo incluyen la división sectorial calibrada a la matriz de insumo-producto, una economía abierta para dar cuenta del comercio con el resto del mundo, búsqueda y emparejamiento en el mercado laboral para modelar la transición de los trabajadores entre sectores y la adaptación endógena de la tecnología, relacionados con el uso de energía.

La estructura sectorial del modelo se calibra utilizando un cuadro de insumo-producto para la economía boliviana para el año 2014. El cuadro de insumo-producto se derivó de la tabla de oferta y uso de Bolivia para el mismo año. En el modelo se distinguen los siguientes sectores y productos: agricultura; silvicultura; minería de petróleo crudo; minería de gas; minería de productos restantes; industria manufacturera; fabricación de productos refinados del petróleo; electricidad de combustibles fósiles; electricidad renovable; construcción; transporte; servicios de mercado; servicios públicos.

Los detalles técnicos tales como ecuaciones exactas, calibración y métodos de solución del modelo MEMO se pueden encontrar en el informe de investigación de Antosiewicz y Kowal (2016). Sin embargo, la especificación exacta del modelo utilizado en este estudio difiere ligeramente del modelo descrito en el informe de investigación, para adaptarlo a la realidad boliviana.

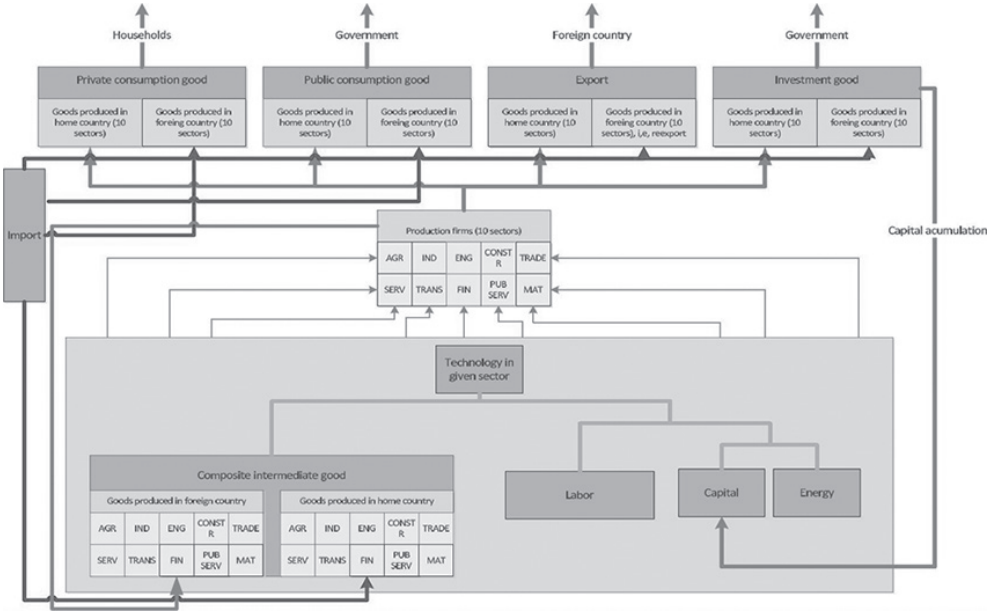
Hay varios conjuntos distintos de parámetros cuyos valores deben calcularse. El conjunto principal de parámetros es responsable de calibrar la estructura sectorial del modelo. Estos parámetros pueden especificarse, además, como los que gobiernan la estructura de valor agregado de los sectores, la inversión y compensación de los empleados en cada sector, la estructura de uso intermedio que toma en cuenta los bienes producidos e importados en el país y la estructura de uso final que también toma en cuenta los bienes producidos e importados a nivel nacional. El esquema de producción del modelo se muestra en el Gráfico 2. Estos parámetros se calibran utilizando la matriz de entrada-salida (IO) derivada. La matriz IO derivada sigue el enfoque de industria-industria para alinearse mejor con los datos estadísticos de Bolivia.

Gráfico A1: Flujo de la economía



Fuente: Antosiewicz *et al.* (2020)

Gráfico A2: Esquema de producción



Fuente: Antosiewicz *et al.* (2020)

La derivación de la matriz de insumo-producto para Bolivia para el año 2014 se realizó utilizando la matriz de oferta y uso del año 2014. La matriz muestra la oferta de 35 productos por 35 industrias, la producción total de cada sector, así como el valor de la producción, las importaciones, los impuestos y el margen minorista y comercial asociado a cada producto. La matriz de uso muestra el uso de 35 productos por las 35 industrias, el uso intermedio, la producción y el valor agregado de las 35 industrias, así como el uso final de los productos. El uso final se desagrega en consumo de los hogares, consumo público, formación de capital, variación de existencias y exportaciones.