

MONOGRAFÍA

NUEVOS HORIZONTES DE TRANSFORMACIÓN PRODUCTIVA EN LA REGIÓN ANDINA

Desafíos globales, soluciones locales.

Modelando el proceso de descarbonización en la Región Andina



Desafíos globales, soluciones locales.

Modelando el proceso de descarbonización

en la Región Andina

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Andrián, Leandro.

Desafíos globales, soluciones locales: modelando el proceso de descarbonización en la Región Andina / Leandro Gastón Andrián, Carlos Miguel Álvarez.

p. cm. — (Monografía del BID ; 1109)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climate change mitigation-Andes Region. 2. Greenhouse gas mitigation-Andes Region. 3. Renewable energy sources-Andes Region. I. Álvarez, Carlos Miguel. II. Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Países del Grupo Andino. III. Título. IV. Serie.

IDB-MG-1109

Códigos JEL: C68, H23, O44, Q43, Q51, Q56

Palabras clave: Impuesto, emisión de gases efecto invernadero, energía, modelo climático, matriz energética, combustible fósil, descarbonización, petróleo

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



TABLA DE CONTENIDO

RECONOCIMIENTOS 5

INTRODUCCIÓN 6

CAPÍTULO 1. OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS DE LAS ECONOMÍAS ANDINAS FRENTE A LA DESCARBONIZACIÓN GLOBAL 8

| | |
|--|----|
| 1.1 Introducción | 8 |
| 1.2 Breve descripción del modelo y las economías | 9 |
| 1.3 Descripción de los escenarios | 13 |
| 1.4 Canales de transmisión | 15 |
| 1.5 Las economías andinas frente a distintos escenarios de descarbonización global | 19 |
| 1.6 Descarbonización doméstica: reducir las emisiones en los países andinos | 23 |
| 1.7 Conclusiones | 30 |

CAPÍTULO 2. IMPACTO ECONÓMICO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LOS PAÍSES ANDINOS..... 31

| | |
|--|----|
| 2.1 Introducción | 31 |
| 2.2 Escenarios de transición | 35 |
| 2.3 Emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energético | 37 |
| 2.4 Emisiones | 39 |
| 2.5 Consumo final de energía | 45 |
| 2.6 Generación eléctrica | 52 |
| 2.7 Conclusiones | 55 |
| 2.8 Anexos | 58 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| CAPÍTULO 3. | |
| ESTRÉS HÍDRICO Y DE TIERRA | |
| EN PAÍSES ANDINOS..... | 62 |
| 3.1 Introducción | 62 |
| 3.2 Método y datos | 64 |
| 3.3 Resultados | 66 |
| 3.4 Conclusiones | 72 |
| 3.5 Anexos | 73 |
| REFERENCIAS..... | 81 |

RECONOCIMIENTOS

La presente publicación forma parte de una colección de trabajos realizados por el Banco Interamericano de Desarrollo para apoyar el diálogo de políticas sobre transición productiva en los países andinos. Fue editada por Leandro Andrián y Carlos Miguel Álvarez.

Las contribuciones de cada capítulo se detallan a continuación:

Introducción: Carlos Miguel Álvarez (Banco Inter-Americano de Desarrollo)
Leandro Andrián (Banco Inter-Americano de Desarrollo)

Capítulo 1: Leandro Andrián
Carlos Miguel Álvarez
Martín Cicowiez (Universidad Nacional de La Plata)

Capítulo 2: Carlos Heros Abramonte (Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico)
Daniel De La Torre Ugarte Pierrend (Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico)
Ricardo Delgado (Centro Regional de Estudios de Energía)
Miguel H. Fernandez Fuente (Immersive SRL. & Innovación Sostenible SRL)
Tomás Gonzalez (Centro Regional de Estudios de Energía)
Carlos A.A. Fernandez Vazquez (Immersive SRL. & Innovación Sostenible SRL)
Pedro Rochedo (Universidade Federal Do Rio de Janeiro)
Elias Ruíz Elias (Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico)
Rafael Soria (Institute for Energy and Materials, Universidad San Francisco de Quito)
Daniel Villamar (Institute for Energy and Materials, Universidad San Francisco de Quito)

Capítulo 3: Augusto Chávez (Banco Inter-Americano de Desarrollo)
Kuishuang Feng (University of Maryland)
Raúl Muñoz (Banco Inter-Americano de Desarrollo)
Eveline Vasquez Arroyo (Banco Inter-Americano de Desarrollo)
Xiangjie Chen (University of Maryland)

Agradecimientos

Queremos agradecer a Carlos Sucre por sus valiosos comentarios. El cuidado editorial de esta publicación estuvo a cargo de Ximena Ríos, y la diagramación y el diseño a cargo de Sara Ochoa. Igualmente, queremos agradecer el invaluable apoyo de Sonia Donayre y José Luis Lobera en la divulgación de la presente publicación.

INTRODUCCIÓN

Los acuerdos mundiales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) están generando un replanteo de los procesos de producción de bienes y servicios a nivel global. Esto implica una sustitución de tecnologías que utilizan como fuente de energía combustibles fósiles por tecnologías más limpias o ambientalmente sostenibles. A su vez, la mayor demanda de fuentes de energía renovables implica un cambio en la matriz energética de los países.

La Región Andina, como el resto de América Latina, presenta una serie de desafíos y oportunidades relacionados con un tema crucial: el proceso de descarbonización global. Por lo tanto, es fundamental abordar una diversidad de temas derivados de este proceso para trazar un camino que permita reducir los desafíos y maximizar las oportunidades. En el presente documento, se ha examinado la descarbonización desde tres aspectos esenciales: las economías andinas frente a distintos escenarios de descarbonización global, la transición energética hacia fuentes renovables, y el estrés hídrico y de tierra. Estos temas están interconectados y tienen un impacto significativo en el desarrollo sostenible de la región.

A través del análisis de diversos escenarios y simulaciones, es posible identificar aspectos claves para la región y generar ideas sobre las opciones de política necesarias para afrontar estos desafíos y capitalizar las oportunidades que se presentan. Estos análisis permiten comprender mejor los posibles resultados y los efectos de diferentes enfoques. A su vez, al examinar una amplia gama de escenarios, se obtiene una visión más completa de las implicancias de distintos ritmos de aceleración de descarbonización global, lo que permite fomentar tomas de decisiones informadas. Además, al considerar las oportunidades emergentes, se pueden diseñar políticas que fomenten el desarrollo sostenible y promuevan la transición hacia un futuro energético más limpio y resiliente en la Región Andina.

El primer capítulo se centra en el impacto de distintos escenarios de descarbonización global en las economías andinas, simulado mediante diferentes trayectorias del precio del petróleo. Así, a mayor ritmo de aceleración de descarbonización global, mayor es la caída en la demanda y el precio del petróleo. Se examinan escenarios alternativos en comparación con un escenario base de largo plazo, y se destaca el hecho de que caídas en el precio del petróleo podrían tener efectos negativos y significativos en el consumo de los hogares, la inversión privada y el comercio exterior de la región. Luego, se analiza el impacto de la introducción de un impuesto al uso de los combustibles fósiles para reducir las emisiones de GEI, obteniendo resultados similares. A su vez, se analiza cómo potenciar otros sectores productivos que sean capaces de compensar la caída en la renta petrolera. En particular, se examina cómo el aumento de la inversión pública en infraestructura básica puede compensar los efectos adversos de la caída en el precio del petróleo y el impuesto al uso de combustibles fósiles. En general, se concluye que las políticas fiscales adecuadas y el aumento de la inversión en infraestructura pueden ofrecer oportunidades para mitigar el efecto negativo de la descarbonización e impulsar el crecimiento y el bienestar en las economías andinas.

El segundo capítulo aborda la transición de la matriz energética en los países andinos. La necesidad de una matriz energética más limpia y renovable se ha vuelto imperativa en el contexto de la descarbonización global. Los países andinos enfrentan desafíos significativos debido a la dependencia de los combustibles fósiles y a las limitaciones de recursos para invertir en infraestructuras y tecnologías limpias. A pesar de tener bajos niveles de consumo de energía y emisiones per cápita en comparación con el promedio mundial, estos países deben abordar la transición energética de manera integral. Esto implica garantizar

la generación de la energía necesaria para el desarrollo sostenible sin comprometer la asequibilidad ni la seguridad del suministro. Además, también se destacan las oportunidades que ofrece la adopción de tecnologías sostenibles, como el impulso al desarrollo económico, la generación de empleo y la mejora de la calidad de vida. La diversificación de la matriz energética hacia fuentes renovables, como la solar y la eólica, puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fortalecer la seguridad energética de la región.

En el tercer capítulo se analizan los desafíos relacionados con el estrés hídrico y de tierra en los países andinos. A medida que aumenta la producción agrícola y la expansión de las tierras cultivables, se genera presión sobre los recursos hídricos y de tierra en la región. La proyección de la demanda futura depende de factores socioeconómicos, como la población, los ingresos y la urbanización, así como del comercio internacional. Se destaca la importancia de considerar el cambio climático en el análisis, ya que afecta directamente la productividad agrícola. Aunque se identifican desafíos en términos de agotamiento de reservas, reducción de emisiones y competencia por los recursos, también se resaltan las oportunidades que surgen de la demanda internacional de productos agrícolas, dado que pueden generar oportunidades económicas y contribuir al desarrollo de los países andinos. Convertir estos retos en posibilidades de crecimiento y desarrollo sostenible depende, en parte, de la reducción de estrés que se genere sobre sus recursos. Para llegar a esto, podría ser esencial generar desarrollos en infraestructura de riego, especialmente en los casos donde se llega al límite natural de expansión de tierras cultivables o se implementan leyes que restringen dicha expansión.

Si bien los temas abordados en cada capítulo son distintos, existen enlaces y puntos de conexión que resaltan la importancia de estos temas y las principales propuestas de política. En primer lugar, los tres capítulos destacan la necesidad de abordar el cambio climático y la descarbonización como desafíos claves para los países andinos, a la vez que resaltan la cooperación regional y el intercambio de experiencias exitosas para enfrentar estos retos. Tanto la volatilidad del precio del petróleo como la dependencia de los combustibles fósiles plantean riesgos significativos para la estabilidad económica y el desarrollo sostenible en la región. Por lo tanto, es crucial promover políticas que fomenten la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

En segundo lugar, los tres capítulos resaltan la importancia de la planificación y la inversión en infraestructura básica para mitigar los efectos adversos de la descarbonización y promover el desarrollo sostenible. La inversión pública en infraestructura puede impulsar el crecimiento económico, generar empleo y mejorar la calidad de vida de la población en los países andinos (de la Cruz *et al.*, 2020).

En tercer lugar, cada capítulo enfatiza la necesidad de políticas y regulaciones claras que fomenten la inversión en energías renovables y promuevan la eficiencia en el uso de recursos naturales, como el agua y la tierra. La implementación de incentivos, junto con marcos regulatorios estables, puede fomentar la adopción de tecnologías limpias y sostenibles, así como la diversificación de la matriz energética y la reducción de la demanda de recursos naturales.

En resumen, la descarbonización y la transición energética en la Región Andina son un proceso complejo y de gran relevancia. Sin embargo, los desafíos relacionados con la descarbonización global, la transición energética hacia fuentes renovables y el estrés hídrico y de tierra representan oportunidades para impulsar el desarrollo sostenible en los países andinos. La implementación de políticas fiscales adecuadas, la inversión en infraestructura y la adopción de tecnologías limpias son propuestas claves que pueden contribuir a abordar estos desafíos y aprovechar las oportunidades para construir un futuro más sostenible y próspero. Además, es fundamental fomentar políticas comunes en la región.

CAPÍTULO 1.

OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS DE LAS ECONOMÍAS ANDINAS FRENTE A LA DESCARBONIZACIÓN GLOBAL

1.1 Introducción

El proceso de descarbonización global impone una serie de desafíos para los países de la Región Andina. Por un lado, la menor demanda de hidrocarburos implicaría una caída del principal producto exportable de las economías andinas. Asimismo, asumir los compromisos de reducción de emisión de GEI por parte de los países de la región implica aplicar medidas de política que tienen efectos sobre la actividad económica a nivel agregado y sectorial. Tratar de predecir la evolución de una economía ante estos desafíos es una tarea compleja. Sin embargo, el uso de escenarios permite analizar algunos de estos retos y oportunidades a los que se enfrenta la región, a la vez que agrega valor al debate sobre la política pública informada.

En este capítulo, se utiliza un modelo de equilibrio general computable (EGC) dinámico recursivo¹, el cual será descrito en los siguientes párrafos y que se usará para abordar las preguntas de interés: ¿Cómo uno de los aspectos del proceso de descarbonización mundial —como la potencial caída de la demanda del petróleo y, por tanto, de su precio— puede afectar a la Región Andina? ¿Qué efectos tiene la introducción de un impuesto al uso de combustibles fósiles sobre las economías andinas? ¿Qué sectores pueden apuntalarse para revertir los efectos negativos que tendría la caída del precio del petróleo y la reducción de las emisiones de GEI?

El capítulo se organiza de la siguiente manera: primero, se presenta una breve descripción del modelo y de las economías andinas. A continuación, se describen los escenarios de descarbonización global que se capturan mediante diferentes trayectorias de precios del petróleo. Luego, se analizan las economías andinas ante los diferentes escenarios. Posteriormente, se aborda el tema de la descarbonización a nivel doméstico, explorando las estrategias para reducir las emisiones en los países andinos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de política derivadas del análisis realizado.

¹ El modelo utilizado se denomina IEEM (*Integrated Economic-Environmental Model*) y es un modelo desarrollado en el BID y ampliamente documentado en <https://openieem.iadb.org/>.

1.2 Breve descripción del modelo y las economías

Los EGC son herramientas matemáticas que permiten comprender y analizar una economía en su totalidad, considerando las interacciones entre la producción, la demanda de productos, los insumos intermedios, los precios, los costos y otros elementos que aseguran el equilibrio económico (Dixon *et al.*, 1992). A su vez, en la academia se la considera la metodología analítica más adecuada para evaluar políticas que tienen impactos multisectoriales significativos en la economía en su conjunto (Arrow, 2005).

Para utilizar estos modelos, es necesario contar con información organizada de manera específica en una Matriz de Contabilidad Social (MCS). Esta matriz describe el flujo circular de transacciones entre los distintos agentes económicos durante un período de referencia (King, 1985). La construcción de la MCS se basa principalmente en las cuentas nacionales de un país (European Commission *et al.*, 2009), lo que garantiza la coherencia de los indicadores económicos tradicionales, como el producto interno bruto (PIB), con los resultados obtenidos a través del modelo de equilibrio general computado.

El modelo EGC utilizado en este estudio es un sistema de ecuaciones simultáneas que representan la economía en su conjunto, teniendo en cuenta los vínculos entre los diferentes sectores de producción, los ingresos generados, los hogares, el gobierno y el resto del mundo a través de la balanza de pagos. Estos modelos son valiosas herramientas para analizar políticas y choques, ya que consideran de manera integral el bienestar de los hogares, el presupuesto del gobierno y las diferencias entre los sectores productivos en términos de tecnologías de producción, preferencias de los hogares, acumulación de capital, cambio tecnológico y vínculos con los mercados internos y externos.

Este modelo permite analizar el impacto de los choques dentro de un marco de consistencia contable, donde los ingresos y los gastos deben estar equilibrados, algo que no es posible en enfoques alternativos. Especialmente para los países andinos, que se consideran economías pequeñas, se supone que los mercados internacionales demandan exportaciones y ofrecen importaciones a precios mundiales constantes.

En el caso de los países andinos, este modelo se ha utilizado para evaluar trayectorias alternativas para el uso de la tierra en la Colombia postconflicto (Banerjee *et al.*, 2021), escenarios vinculados al turismo internacional en Bolivia (2019), y escenarios de cambios estructurales en el Amazonas para Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú (Banerjee *et al.*, 2022). Para una comprensión más detallada de la estructura matemática del modelo, se puede consultar el trabajo de Banerjee *et al.* (2019a, 2019b, 2019c, 2019d), donde se proporciona una explicación exhaustiva de la formulación matemática subyacente al modelo.

En este estudio, se utilizan MCS recientemente construidas para la calibración del modelo de EGC. El Cuadro 1.1 presenta el detalle sobre el año base y las dimensiones de cada una de estas matrices. En el caso de Bolivia, el año base utilizado es 2014, y la MCS contempla 24 actividades o sectores productivos, así como el mismo número de productos, que incluyen bienes y servicios. Para Colombia, la MCS con año base 2017 abarca 37 sectores y 38 productos. En Ecuador, la MCS comprende 31 sectores y una cantidad igual de productos, utilizando 2019 como año base. Por último, en el caso de Perú, se utiliza una MCS con 29 sectores productivos y 31 productos, y 2017 como año base².

2 Tres de los cuatro países andinos analizados tienen cuentas económicas integradas (CEI) y cuadros de oferta y utilización (COU), lo que proporciona una sólida base de datos para la calibración del modelo. Los COU describen la oferta y la demanda de productos de un país, incluyendo las relaciones insumo-producto entre sectores productivos. Las CEI describen cómo se determina el ingreso y el gasto de cada sector institucional. En el caso de Perú, las CEI se reemplazaron con información sobre ingresos y gastos del Gobierno y de la balanza de pagos.

Cuadro 1.1. Año y dimensiones matrices de contabilidad social, países andinos

| País | Año MCS (y COU) | #act | #prod | CEI |
|----------|-----------------|------|-------|-----|
| Bolivia | 2014 | 24 | 24 | Sí |
| Colombia | 2017 | 37 | 38 | Sí |
| Ecuador | 2019 | 31 | 31 | Sí |
| Perú | 2017 | 29 | 31 | No |

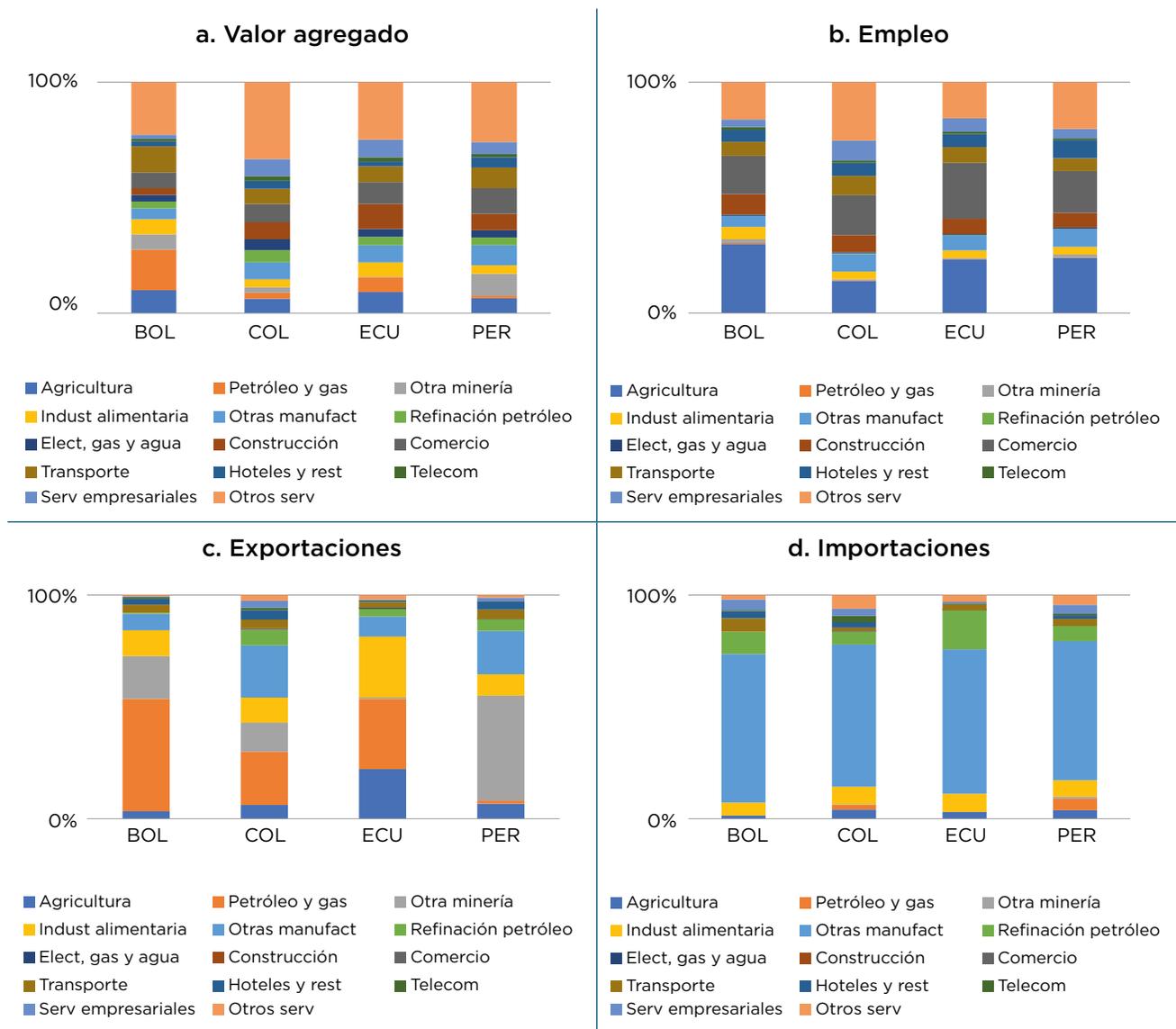
Fuente: elaboración propia.

A continuación, se proporciona una descripción de las estructuras socioeconómicas de los países andinos utilizando las MCS. Esta información resulta útil para la interpretación de los resultados obtenidos mediante las simulaciones desarrolladas. Por ejemplo, conocer la intensidad de uso factorial (p. ej., relación trabajo/capital) de cada sector productivo permite explicar el patrón de factores ganadores y perdedores que resulta, *ceteris paribus*, de un incremento de la inversión pública. Además, los sectores más (menos) orientados al comercio internacional se verán directamente perjudicados (beneficiados) por una apreciación del tipo de cambio real que podría ocurrir, por ejemplo, debido a un aumento del endeudamiento externo del gobierno. La información que se presenta a continuación identifica once sectores productivos. Sin embargo, las simulaciones que se analizan en el capítulo consideran todos los sectores productivos identificados en las MCS de cada país.

Los paneles a-d del Gráfico 1.1 proporcionan un resumen de la estructura sectorial de las economías de los países andinos en términos de valor agregado, empleo, exportaciones e importaciones. En general, se aprecia que, en todos los países, pero especialmente en Colombia, la producción de servicios representa la mayor proporción del PIB en cuanto a valor agregado. Por su parte, las actividades asociadas con el sector hidrocarburos representa una porción importante del PIB en todos los países, especialmente en Bolivia y con la excepción de Perú. En este último, la minería metálica representa una proporción importante del valor agregado. Además, la producción de agroalimentos representa entre 9,7% (Colombia) y 16,4% (Bolivia) del valor agregado.

En términos de empleo, se destaca el sector agroalimentario con participaciones que varían entre 17% (Colombia) y 35,3% (Bolivia) del empleo total. Es decir, se trata de sectores con una relación relativamente baja entre valor agregado y empleo. De igual modo, cabe mencionar al sector comercio con participaciones en el empleo que van desde 16,7% en Bolivia hasta 23,9% en Ecuador. Por su parte, los sectores mineros y la actividad del sector hidrocarburos representan proporciones muy pequeñas del empleo total en los cuatro países.

Gráfico 1.1. Estructura sectorial de las economías andinas en el año base



Fuente: elaboración propia.

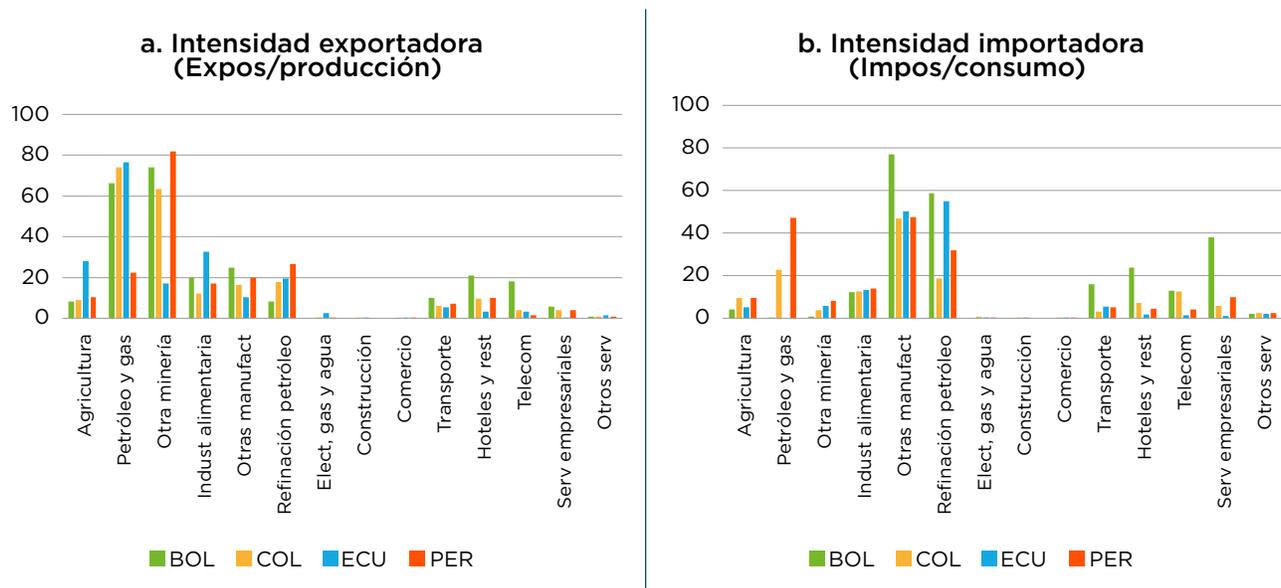
En cuanto a las exportaciones, se puede apreciar la alta dependencia con el sector hidrocarburo en Bolivia, Ecuador y Colombia, mientras que en Perú, la dependencia se da con el sector minero. Se destaca también la importancia del sector minero en Bolivia y Colombia. A su vez, en el panel a del Gráfico 1.2 se puede apreciar cómo estos sectores también son orientados a la exportación al reflejar niveles de intensidad exportadora por encima del 60% para la mayoría de los países. En el caso de Bolivia, el sector agroalimentario representa una proporción importante de las exportaciones totales, así como niveles de intensidad exportadora superiores al 25%³.

En lo que respecta a las importaciones, los productos manufacturados de origen industrial concentran la mayor parte de las importaciones en los cuatro países; en particular, en productos tales como

³ Se incluye el sector pesquero dentro de agricultura, particularmente relevante para Ecuador.

maquinaria y equipo, y vehículos. Por ejemplo, el 80,2% de la maquinaria y equipo utilizado en Perú es de origen importado. Cabe destacar que, en todos los países, pero especialmente en Ecuador (17,7%), las importaciones de productos refinados de petróleo representan una porción relativamente grande del total. Sin embargo, en Perú, si se incluye petróleo y gas, las importaciones del sector hidrocarburos superan el 15%. También es relevante mencionar que la intensidad importadora (panel b del Gráfico 1.2) en el sector hidrocarburos es superior al 40% en todos los países.

Gráfico 1.2. Orientación exportadora e importadora de las economías andinas en el año base



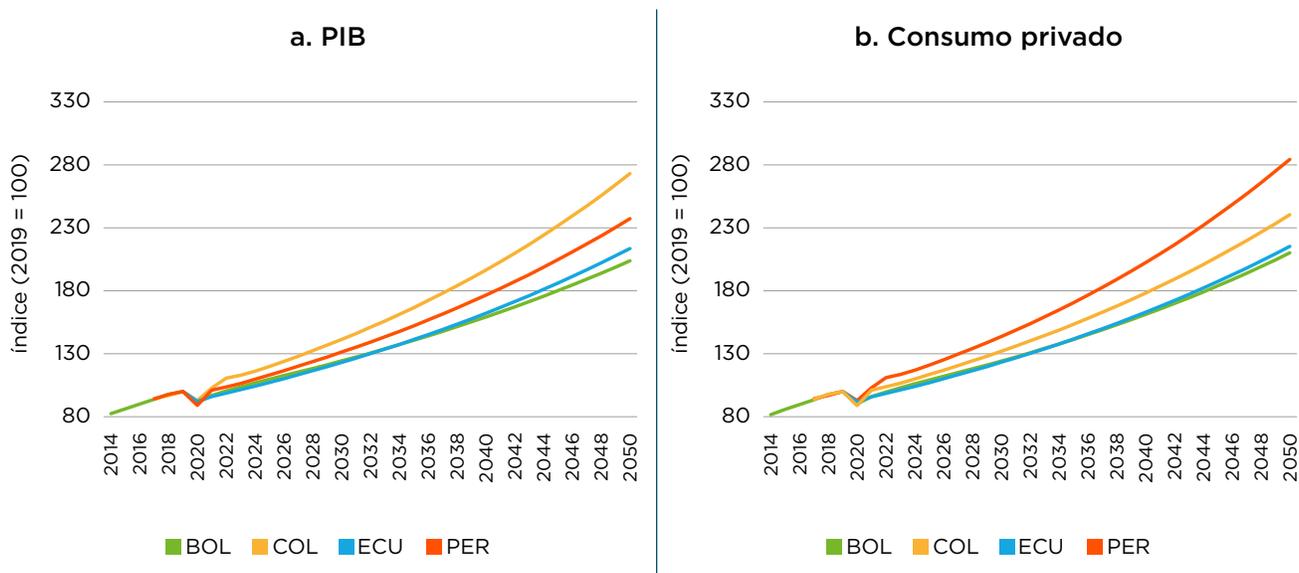
Fuente: elaboración propia.

1.3 Descripción de los escenarios

1.3.1 El escenario base

En primer lugar, se simula el escenario base o *business as usual*, el cual proyecta la evolución de las economías andinas hasta 2050. El escenario base se genera bajo el supuesto de que las políticas existentes en el año base no se modifican. Por otro lado, se supone que los precios mundiales de los hidrocarburos replican las trayectorias observadas hasta 2021 para permanecer constantes durante el período 2022-2050. Es decir, el escenario base supone que el precio mundial del barril de petróleo se mantiene constante, en términos reales, en USD 70 el barril desde 2021 hasta 2050⁴. El precio internacional de los refinados de petróleo sigue la misma evolución que el precio del crudo. También se suponen exógenas las tasas de crecimiento del PIB. Las mismas replican las proyecciones de *Perspectivas de la Economía Mundial* (WEO, por sus siglas en inglés) del FMI⁵ para los años 2022 a 2027. Las tasas de crecimiento para el período 2028-2050 se suponen iguales a las proyectadas para 2027⁶ (ver el Gráfico 1.3 para la evolución del PIB y el consumo de los hogares). Por construcción, el escenario base supone que las economías de los países andinos evolucionan de forma balanceada en el sentido de que los agregados macroeconómicos crecen todos a tasas similares. De esta manera, el escenario base permite construir un punto de comparación en donde las economías andinas evolucionarían bajo condiciones relativamente estables.

Gráfico 1.3. PIB y consumo privado en el escenario base (2019=100)



Fuente: elaboración propia.

- 4 El valor supuesto para el precio del petróleo no dista mucho de lo observado en los últimos veinte años. Así, para el período 1990-2021, el precio del petróleo ha estado, en promedio, a USD 64/bl a precios de 2021.
- 5 Octubre de 2022.
- 6 Las tasas de crecimiento supuestas a partir de 2027 son muy cercanas a los promedios históricos (1980-2019) de los países andinos. Así, las medias geométricas son 2,5% para Bolivia, 3,5% para Colombia, 2,8% para Ecuador y 3% para Perú; mientras que las tasas proyectadas son 3,0% para Bolivia, 3,5% para Colombia, 2,8% para Ecuador y 3,2% para Perú.

1.3.2 Escenarios alternativos

El análisis se realiza a partir de simulaciones para los escenarios alternativos con el fin de comparar, en cada país de la Región Andina, la evolución de la economía ante los choques introducidos con la evolución de la economía en ausencia de choques (vale decir, escenario base). En este sentido, se desarrollan los escenarios alternativos:

- a) Escenarios de descarbonización global capturados a través de diversas trayectorias en los precios internacionales del petróleo, sus derivados y el carbón: las trayectorias de precios fueron tomadas del *World Energy Outlook 2021* de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés). Se actualizaron las trayectorias modificando los valores de los primeros años en función del histórico, y se usaron transiciones más suaves para converger a los valores de 2050 presentados por la IEA (ya que solo presenta valores en 2020, 2030 y 2050). De esta manera, los precios de referencia al 2050 para el petróleo por barril serían USD 24 para el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2050”; USD 50 para el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2070”; USD 64 para el escenario “Políticas anunciadas”; y USD 88 para el escenario “Políticas actuales” para cada escenario (ver capítulo 2 para una descripción más detallada)⁷,
- b) Impuesto al uso de combustibles fósiles⁸. A partir de esta simulación, solo se consideran los escenarios de USD 24 para “Energía para cero emisiones netas en 2050” y USD 50 para “Energía para cero emisiones netas en 2070” para el análisis,
- c) Usos alternativos para la recaudación que generan los impuestos al uso de combustibles fósiles. En particular, se consideran los impactos que habría de incrementar la inversión pública en infraestructura básica destinada a la promoción de distintos sectores productivos.

Con el fin de comprender el impacto de cada aspecto de las simulaciones realizadas, se introducen de forma secuencial los distintos choques. Es decir, primero se analiza el escenario base (ausencia de choques); segundo, se observa el comportamiento de las economías andinas bajo distintas trayectorias del precio del petróleo; tercero, se incorpora un impuesto al uso de combustibles fósiles para reducir las emisiones de GEI domésticamente, y finalmente, se analiza cómo la recaudación adicional generada por el impuesto al uso de combustibles fósiles puede ser utilizada para fomentar distintos sectores de la economía.

⁷ En todos los escenarios, la extracción de hidrocarburos se modela mediante una curva de oferta con pendiente positiva. Es decir, la extracción de hidrocarburos sube (baja) ante un aumento (disminución) de la remuneración factorial correspondiente. Por ejemplo, una caída del precio mundial del petróleo impacta negativamente sobre la renta petrolera y, en consecuencia, se reduce la producción (o extracción) de petróleo. En términos generales, la literatura encuentra que, a nivel mundial, la elasticidad-precio de la producción de petróleo es baja (es decir, está en el rango de 0.01-0.15).

⁸ Cabe mencionar que en Colombia existe, desde 2017, un impuesto al uso de combustibles fósiles que solo alcanza a los siguientes combustibles: gas natural, gas licuado de petróleo, gasolina, querosene jet fuel, ACPM (o diésel) y fueloil.

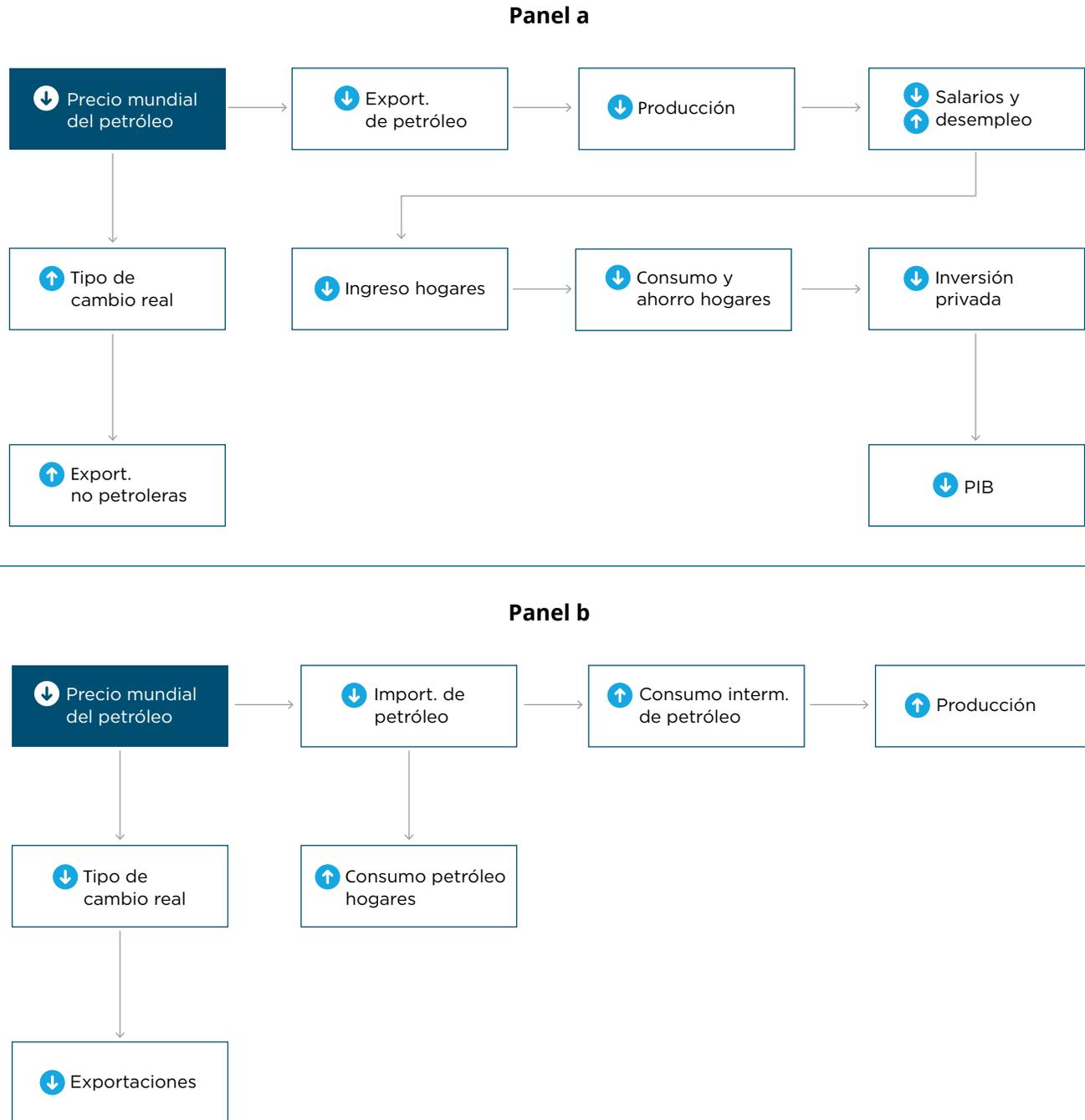
1.4 Canales de transmisión

En el tiempo, el volumen de la producción se determina tanto por el nivel de uso factorial como por el nivel de productividad factorial. El crecimiento del *stock* de capital es endógeno, porque depende de la inversión y la depreciación. En los demás casos (trabajo y recursos naturales), las ofertas proyectadas para cada período son exógenas. La oferta laboral se proyecta como función de la población en edad de trabajar y las tasas de participación laboral. La tasa de desempleo es endógena. El crecimiento de la productividad total de los factores (PTF) puede depender, endógenamente, del volumen de inversión pública.

En esta aplicación se supone que tanto las actividades productivas como los hogares pueden sustituir distintas fuentes de energía. En particular, utilizamos una función de producción tipo CES (Elasticidad de Sustitución Constante) para representar el supuesto de sustitución imperfecta entre fuentes de energía como, por ejemplo, refinados de petróleo vs. electricidad. Naturalmente, las posibilidades de sustitución entre fuentes de energía dependen de (i) la información del año base (por ejemplo, una actividad productiva que no registra consumo de gas natural en el año base no podrá utilizar gas natural como sustituto de otros combustibles), y (ii) la facilidad con que una fuente de energía puede sustituirse por otra (i.e., la elasticidad de sustitución entre fuentes de energía).

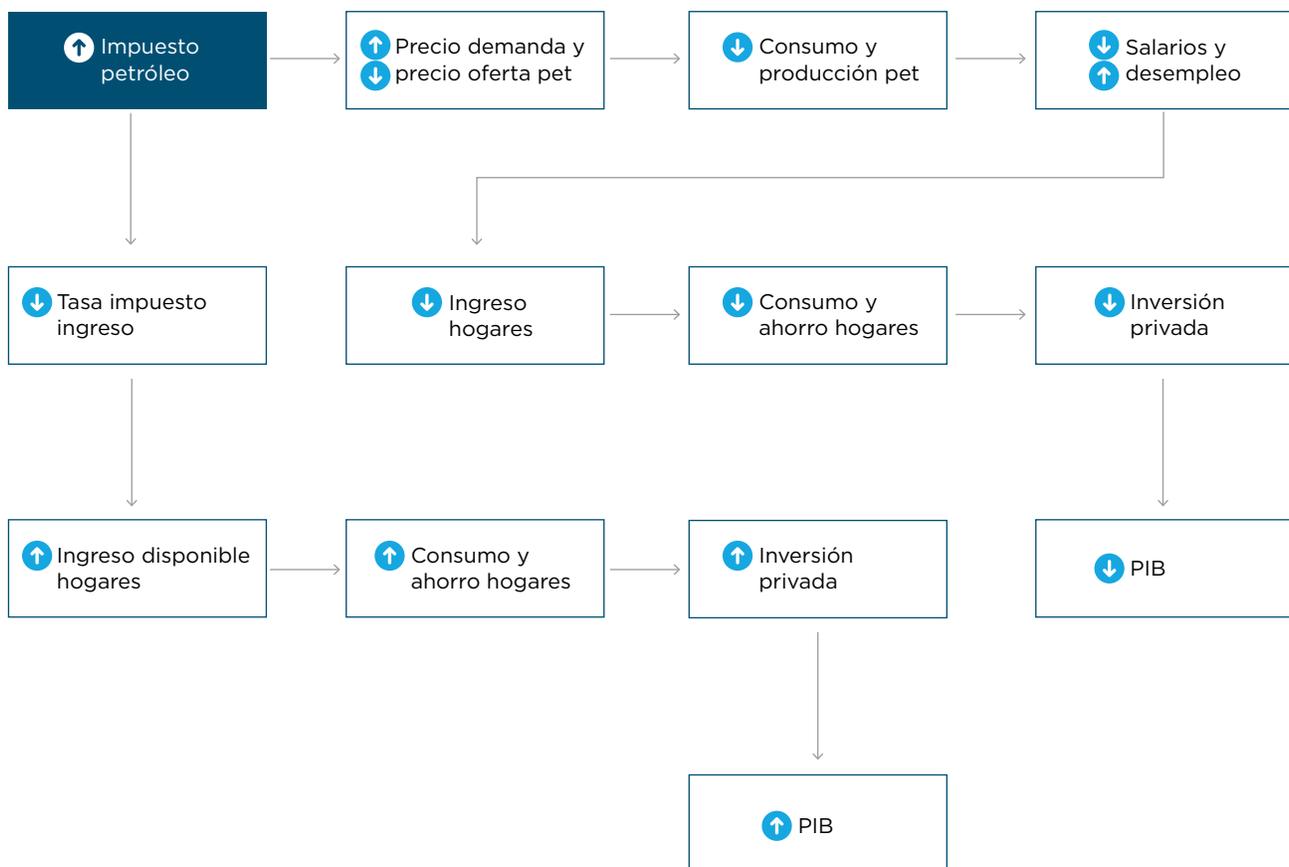
Los paneles a y b del Gráfico 1.4 resumen los principales canales de transmisión que operan cuando se simula una caída del precio mundial de los hidrocarburos en países exportadores e importadores de hidrocarburos, respectivamente. En el primer caso, el deterioro de los términos del intercambio tiene impactos negativos sobre la producción y el ingreso factorial. Luego, la reducción del ingreso de hogares y empresas tiene consecuencias negativas para el ahorro y la inversión privados. Por otro lado, el tipo de cambio real debe depreciarse para mantener constante el saldo de la cuenta corriente de la balanza de pagos. En consecuencia, las importaciones se reducen al mismo tiempo que se promueven las exportaciones de otros productos.

Gráfico 1.4. Canales de transmisión de la variación en el precio del petróleo para países exportadores e importadores



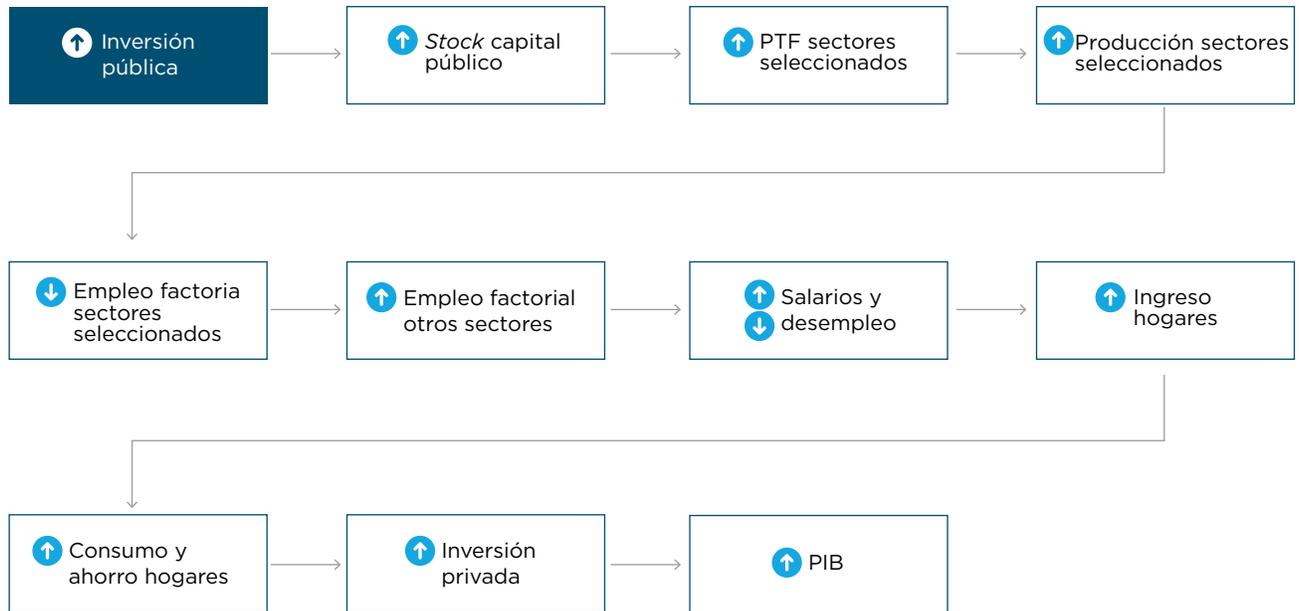
El Gráfico 1.5 resume la secuencia de efectos que se generan cuando se incrementa el impuesto a la utilización de combustibles fósiles al mismo tiempo que se reducen los impuestos sobre el ingreso de hogares y empresas con el objetivo de mantener balanceado el presupuesto del gobierno. En este caso, hay efectos contrapuestos sobre el PIB —positivos por la reducción de impuestos al ingreso que promueven el ahorro y la inversión privados, y negativos por el incremento del impuesto al uso de combustibles fósiles—. Además, el cambio de precios relativos tiene impactos sobre la canasta de consumo de los hogares y sobre el costo de producción de las actividades productivas, es decir, el impuesto al uso de combustibles fósiles tiende a desalentar la producción y el consumo de combustibles fósiles en favor de otras tecnologías y bienes.

Gráfico 1.5. Canales de transmisión de un aumento en el impuesto al uso de combustibles fósiles



Por último, el Gráfico 1.6 resume los principales canales de transmisión para los escenarios de inversión en infraestructura productiva. El incremento de la inversión pública en infraestructura productiva (o básica) aumenta el *stock* (o la calidad) de capital público; esto, a su vez, impacta positivamente sobre la PTF de los sectores seleccionados. Los factores que determinan los efectos que tendrá un aumento de la PTF sectorial son varios: intensidad de uso de factorial, orientación exportadora e importadora, e importancia de los encadenamientos productivos (relaciones insumo-producto) hacia adelante y hacia atrás. En cualquier caso, es esperable que el incremento de la PTF impacte positivamente sobre el ingreso de los hogares; esto, a su vez, tendría efectos positivos sobre el consumo y el ahorro (y la inversión privada).

Gráfico 1.6. Canales de transmisión de un aumento de la inversión pública en infraestructura productiva



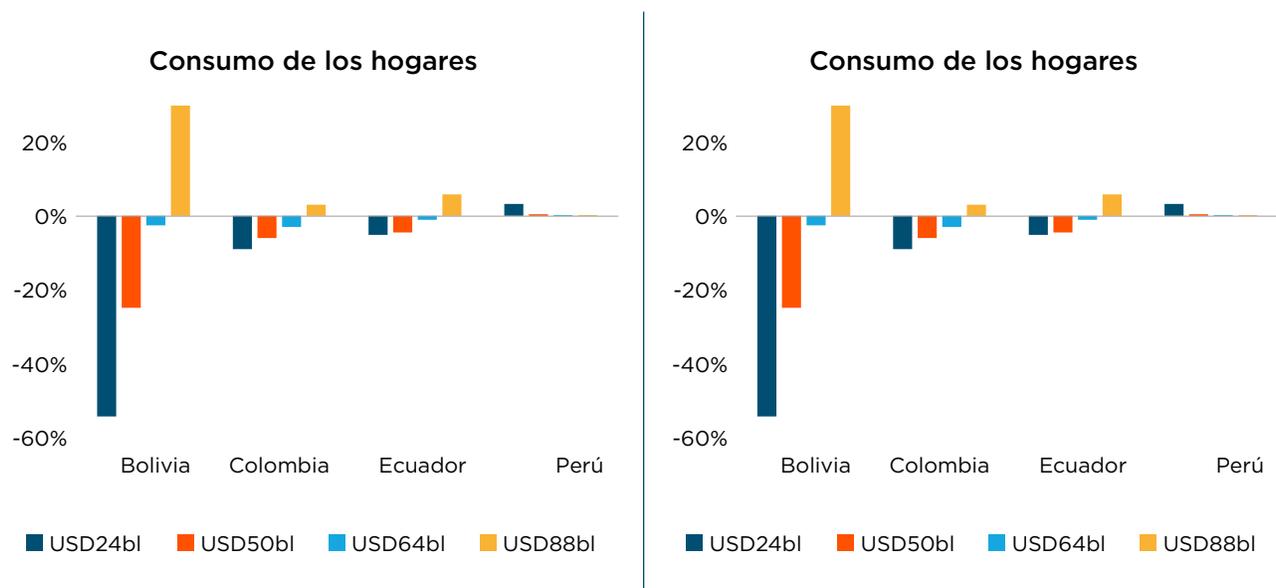
Nota: PTF se refiere a productividad total de los factores.

1.5 Las economías andinas frente a distintos escenarios de descarbonización global

A continuación, se analiza la evolución de las economías andinas ante distintas trayectorias de precios internacionales del petróleo, de forma que capturen los distintos escenarios de descarbonización global considerados. Para tener un punto de comparación con los distintos escenarios realizados, primero se estima y se presenta un escenario base, el cual supone que los factores que determinan el desempeño de las economías andinas se mantienen estables en el tiempo. Luego, se estiman los escenarios bajo distintas trayectorias del precio del petróleo y se los compara con el escenario base. Cabe notar que estos ejercicios no toman en consideración los posibles aumentos de precios de minerales necesarios para la transición energética que provocaría la descarbonización global y que beneficiarían a las economías andinas. El Recuadro 1.1 presenta un ejercicio para el caso boliviano.

Uno de los principales interrogantes que plantea el proceso de descarbonización global para las economías andinas es la posible caída en el precio del petróleo en el largo plazo, dando lugar a lo que se conoce como “activos varados”. Como se mencionó anteriormente, la producción de hidrocarburos impacta en los balances fiscales y las cuentas externas, afectando el desempeño de las economías de la región. Aquí se examina el impacto en el crecimiento y en el bienestar de los países bajo análisis frente a distintas trayectorias del precio del petróleo en el largo plazo. Estos escenarios de la evolución del precio del petróleo son también utilizados en el capítulo 2.

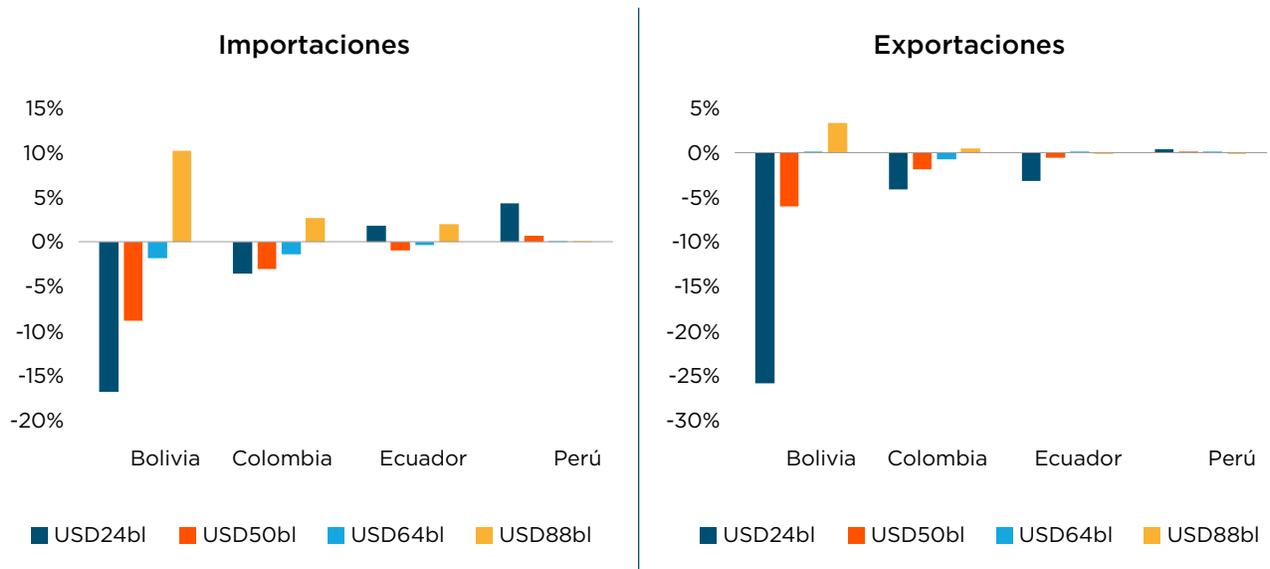
La pérdida de bienestar en los países andinos podría ser cuantiosa. Excepto por el escenario “Políticas actuales”, donde la proyección del precio del petróleo a 2050 (USD 88/bl) es mayor que en el escenario base (USD 70/bl), la caída en el precio provocaría una disminución en el consumo de los hogares y la inversión privada (ver el Gráfico 1.7). La economía que muestra un mayor impacto sería Bolivia, con un nivel de consumo que se ubica 50% por debajo del consumo en el escenario base en el caso extremo de un precio del petróleo de USD 24/bl a 2050. Para Colombia y Ecuador el impacto negativo sería menor, con niveles de consumo entre un 12% y 15% menor que el escenario base. A su vez, la inversión privada tendría las mismas tendencias que el consumo privado, con un stock de capital que avanza a un ritmo más lento impactando, por lo tanto, en el desempeño de las economías. Cabe destacar que, en este escenario, el gobierno compensa mediante impuestos directos la pérdida de ingresos que genera la reducción del precio mundial de los hidrocarburos. De otra manera, si no existiera un ajuste fiscal se tendrían trayectorias explosivas e insostenibles de la deuda pública (Andrián *et al.*, de próxima publicación).

Gráfico 1.7. Consumo e inversión privados en 2050 (desvío porcentual respecto al escenario base)

Fuente: estimación propia.

La caída del precio del petróleo generaría que las economías andinas se cierren al comercio exterior (ver el Gráfico 1.8). Excepto por Perú, la reducción en el ingreso de divisas por la caída en el precio mundial de los hidrocarburos genera una depreciación del tipo de cambio real que, a su vez, incentiva una reducción de las importaciones y un aumento de las exportaciones no petroleras (las cuales no llegan a compensar la caída de las exportaciones petroleras). Así, debido al empeoramiento de sus términos de intercambio, la economía de dichos países andinos se vuelve más cerrada al comercio internacional. Por su parte, al ser Perú un país importador neto de hidrocarburos, los efectos macroeconómicos tienen el signo opuesto. Es decir, ceteris paribus, Perú se beneficia de una reducción en el precio mundial de los hidrocarburos.

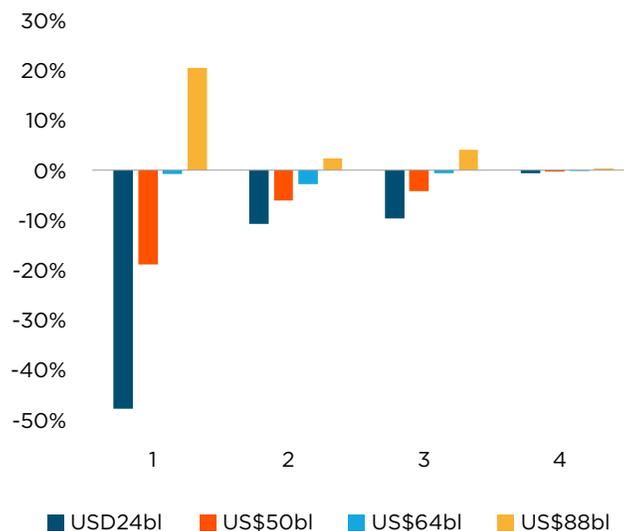
Gráfico 1.8. Comercio exterior en 2050 (desvío en puntos porcentuales del PIB respecto al escenario base)



Fuente: estimación propia.

Los países andinos relegarían crecimiento ante los distintos escenarios de caída del precio del petróleo. El empeoramiento de los términos de intercambio y políticas fiscales más austeras impactarían en el desempeño de las economías andinas. En términos relativos, en el escenario más adverso, el tamaño de la economía de Bolivia podría llegar a ser la mitad con respecto al escenario base, mientras que Colombia y Ecuador serían un 10% más chicas (ver el Gráfico 1.9).

Gráfico 1.9. PIB a 2050 (desvío porcentual respecto al escenario base)



Fuente: estimación propia.

Cabe hacer notar que se observa un comportamiento consistente a través de los escenarios, es decir, a mayor (menor) caída del precio del petróleo respecto al escenario base, mayor (menor) es el impacto en las economías. Debido a este comportamiento, en las siguientes secciones se analizarán ejercicios donde el precio del petróleo a 2050 es USD 24/bl y USD 50/bl, es decir, los escenarios más adversos para las economías andinas (excepto para Perú).

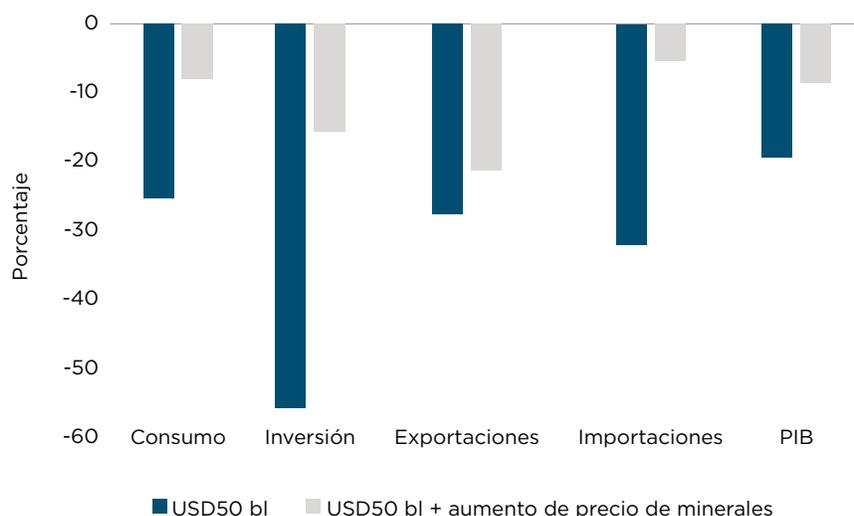
Recuadro 1.1 Escenario “Precios de los minerales con descarbonización”: el caso de Bolivia

Los países andinos poseen yacimientos de productos minerales que, se presume, verán un incremento en su demanda como resultado de la transición energética. Por ejemplo, Bolivia posee grandes yacimientos de litio —un material clave para la fabricación de baterías—. Perú, por su parte, posee yacimientos de ocho minerales importantes para la transición energética (cobre, hierro, plomo, plata, zinc, indio y grafito).

A manera ilustrativa, se simula el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2070” con un incremento en el precio mundial de los minerales que los países andinos actualmente extraen y exportan. Así, este escenario busca aproximar un contexto donde los países andinos se benefician de una mejora en sus términos de intercambio respecto del escenario “Energía para cero emisiones netas en 2070” descrito anteriormente⁹. En otras palabras, la pregunta es si la producción (y extracción) de materias primas necesarias para la transición energética podría compensar (parte de) la caída en el precio mundial de los hidrocarburos.

El Gráfico 1 muestra los resultados para Bolivia en términos de indicadores macroeconómicos seleccionados. Los resultados muestran efectos positivos sobre la economía boliviana. Por ejemplo, en 2050, la caída del consumo privado pasa de 25,3% a 8,0%, respectivamente. En el mismo sentido, también se compensa una porción importante de la caída que genera la reducción del precio mundial de los hidrocarburos sobre los demás indicadores macroeconómicos de Bolivia. También se compensa una porción importante de la caída en el empleo. Los demás países andinos muestran resultados que van en la misma dirección cuando analizamos escenarios similares.

Gráfico 1. Indicadores macroeconómicos Bolivia 2050 (cambio porcentual respecto al escenario base)



Fuente: elaboración propia.

⁹ Cabe destacar que se supone que no hay nuevos descubrimientos significativos de minerales.

1.6 Descarbonización doméstica: reducir las emisiones en los países andinos

Los países de la Región Andina también han asumido compromisos en cuanto a materia de reducción de emisiones. Más allá del impacto que tiene el proceso de descarbonización mundial, la velocidad a la que los países andinos cumplan con las metas de reducción de emisiones de GEI afectará el desempeño de sus economías. En este sentido, Baranzini et al. (2000) y Mondal et al. (2016) sugieren que los impuestos sobre el carbono pueden ser rentables y tener efectos positivos en la reducción de GEI, pero es necesario abordar sus repercusiones en la competitividad y la distribución. Por otro lado, Coxhead et al. (2013) sostienen que los impuestos que tienden a desincentivar el uso de combustibles fósiles pueden aumentar la pobreza y pueden entrar en conflicto con otros objetivos de la política de desarrollo. En términos generales, la literatura sugiere que la eficacia de estos impuestos como política depende de su diseño y aplicación, y es necesario abordar sus posibles efectos negativos. En términos específicos, el impacto del impuesto al carbono o al uso de combustibles fósiles en la economía varía en función del país y de la aplicación concreta del impuesto.

De aquí en adelante, se analiza cómo la introducción de un impuesto al uso de combustibles fósiles afectaría a las economías andinas en combinación con distintos instrumentos de política fiscal. De esta manera, se introduce un impuesto de 20% que grava el uso de refinados de petróleo con el objetivo de reducir las emisiones de GEI durante el período 2023-2050. Con el fin de tener una trayectoria balanceada del presupuesto público, la introducción de este impuesto se realiza en conjunción con una reducción del endeudamiento externo o una reducción del impuesto directo pagado por los hogares y las empresas. En otras palabras, la recaudación adicional “se recicla” ya sea reduciendo endeudamiento o reduciendo otro impuesto.

1.6.1 El impuesto al uso de combustibles fósiles como instrumento para reducir las emisiones

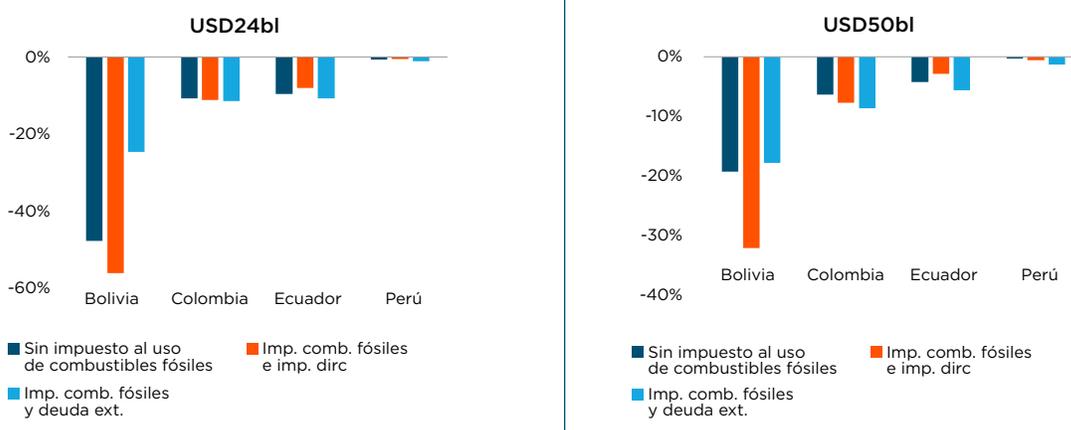
La introducción del impuesto a los combustibles fósiles reduce la necesidad de incrementar impuestos directos para compensar la pérdida de ingresos públicos que genera la caída del precio mundial de los hidrocarburos, excepto Perú, donde la caída del precio mundial de los hidrocarburos tiene efectos positivos. El escenario sin impuesto al uso de combustibles fósiles reemplaza cualquier pérdida de ingreso del gobierno con un incremento de impuestos directos. Entonces, una reducción de los ingresos del gobierno se traduce en un incremento de impuestos al ingreso que reduce el ingreso disponible, el consumo y el ahorro privados, la inversión, el *stock* de capital y el nivel de actividad.

Un impuesto al uso de combustibles fósiles sin coordinación de política fiscal tiene efectos negativos, pero con respuestas heterogéneas. En general, el impuesto al uso de combustibles fósiles causa una caída en el producto mayor comparado con un escenario sin impuesto. Sin embargo, existen casos donde la caída es menor cuando el impuesto al uso de combustibles fósiles es reciclado con impuestos directos (Ecuador y Perú) o cuando es reciclado con deuda externa (Bolivia). En el Gráfico 1.10 se detallan las diferencias en la magnitud del impacto ante los escenarios de descarbonización global seleccionados. Por otro lado, en términos de bienestar, el Gráfico 1.11 detalla el comportamiento similar al PIB por parte del consumo y la inversión total, aunque con magnitudes diferentes. Los resultados son consistentes con Lu et al. (2010), quienes consideran que los impuestos sobre el carbono pueden ser eficaces para reducir las emisiones con escaso impacto negativo en el crecimiento económico, pero que las políticas complementarias, como la reducción de los impuestos indirectos y la concesión de subsidios a los hogares, pueden ayudar a amortiguar los impactos negativos en la economía.

En algunos países (Ecuador, Colombia y Perú), el impuesto al uso de combustibles fósiles genera recaudación tributaria por sobre la que se requiere para compensar la pérdida de ingresos del gobierno que genera la caída del precio mundial de los hidrocarburos. Por lo tanto, el gobierno puede (i) reducir impuestos directos o (ii) reducir el endeudamiento externo. En el primer caso, los efectos positivos que generan un menor incremento de las tasas de los impuestos al ingreso no compensan los efectos negativos de la introducción de un impuesto al uso de combustibles fósiles. En el segundo caso, la reducción del endeudamiento externo implica que la recaudación adicional que genera el impuesto al uso de combustibles fósiles se transfiera al resto del mundo.

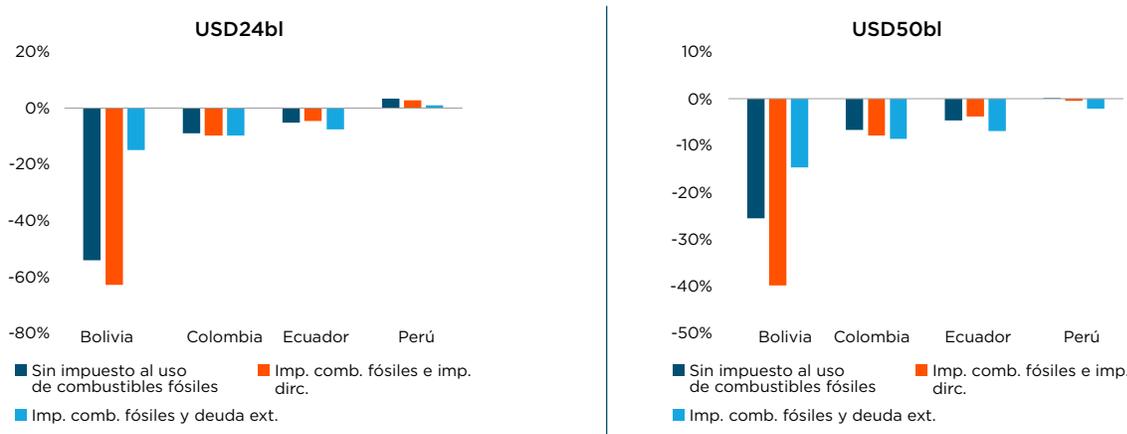
Resulta interesante el caso de Bolivia, porque la introducción del impuesto al uso de combustibles fósiles no logra generar recaudación tributaria adicional. Por lo tanto, el Gobierno debe (i) incrementar los impuestos al ingreso o (ii) incrementar el endeudamiento externo. En el segundo caso, el país utiliza financiamiento externo para compensar las pérdidas de ingreso del Gobierno que generan la reducción del precio mundial de los hidrocarburos y la introducción de un impuesto al uso de combustibles fósiles.

Gráfico 1.10. Impuesto al uso de combustibles fósiles - PIB a 2050 (desvío porcentual respecto al escenario base)



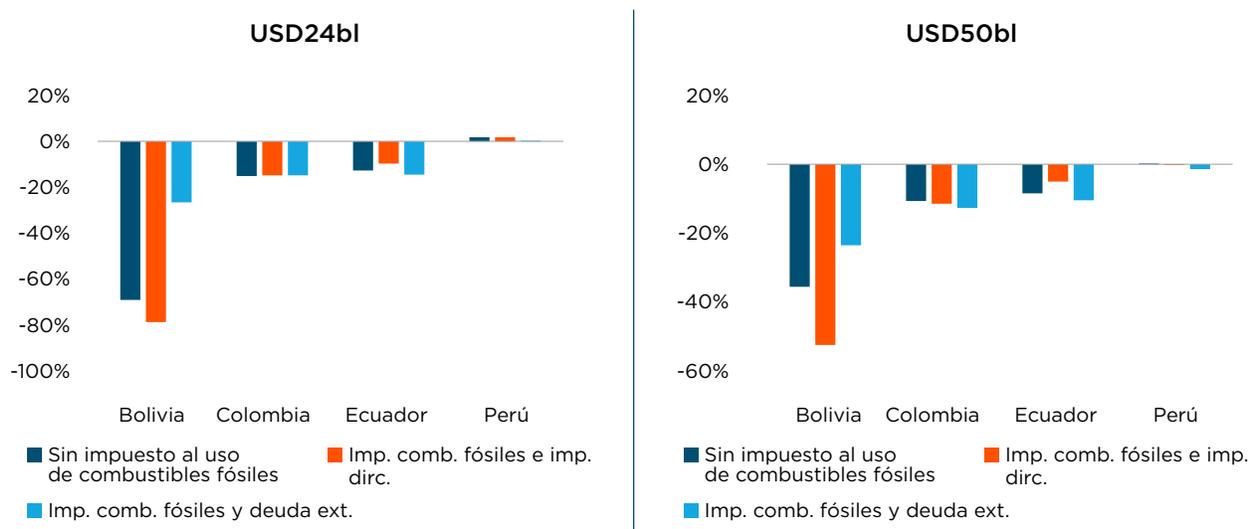
Fuente: estimación propia.

Gráfico 1.11.a. Impuesto al uso de combustibles fósiles - Consumo a 2050 (desvío porcentual respecto al escenario base)



Fuente: estimación propia.

Gráfico 1.11.b. Impuesto al uso de combustibles fósiles - Inversión a 2050 (desvío porcentual respecto al escenario base)



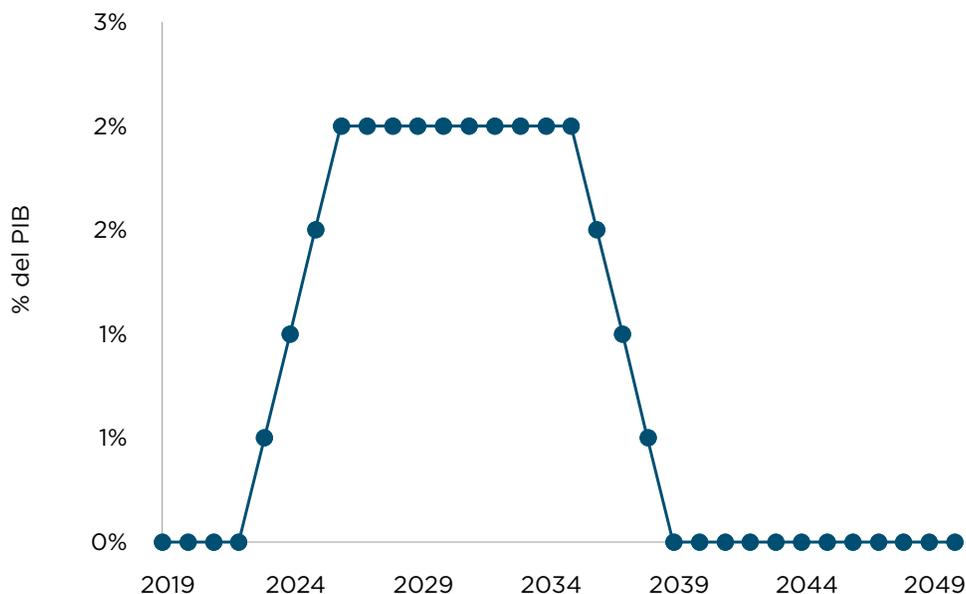
Fuente: estimación propia.

1.6.2 La descarbonización como una oportunidad: aprovechando el impuesto a las emisiones para reimpulsar las economías andinas

Hacia adelante, el proceso de descarbonización también plantea oportunidades. Hasta ahora se ha visto que tanto un contexto de descarbonización global (reflejada en una caída del precio del petróleo) como en escenarios de política, donde el objetivo del gobierno es reducir las emisiones domésticamente, las economías andinas verían una baja en el bienestar y en el crecimiento. Sin embargo, la recaudación fiscal adicional derivada del impuesto al uso de combustibles fósiles se puede redirigir o “reciclar” hacia un aumento del gasto en infraestructura, lo cual puede compensar los efectos negativos de los escenarios vistos en la sección anterior. Más precisamente, en este apartado consideramos escenarios que introducen un incremento (push) de la inversión pública en infraestructura básica que llega de manera escalonada al 2% del PIB del escenario base durante el período 2026-2035 (ver el Gráfico 1.12). Luego, y también de forma escalonada, la inversión pública en infraestructura básica se reduce hasta alcanzar un nivel que permite compensar la depreciación del nuevo stock de capital público¹⁰. Específicamente, los escenarios se centran en¹¹: (i) un aumento en infraestructura que beneficia a todos los sectores productivos de manera simultánea; (ii) agricultura, industria alimentaria, energía y servicios seleccionados (a saber, logística, telecomunicaciones y servicios profesionales y administrativos); (iii) exclusivamente en el sector agropecuario; y (iv) exclusivamente en el sector de servicios.

¹⁰ Además, se supone que la productividad marginal del capital público (MPK) es 0.30 (ver Lowe *et al.*, 2019; Gupta *et al.*, 2014; Dessus y Herrera, 2000). Es decir, por cada peso adicional de inversión pública, la productividad total de los factores se incrementa en un valor equivalente a 0.30 centavos. En este sentido, y a la luz de la evidencia empírica disponible, cabe mencionar que este supuesto para MPK es conservador.

¹¹ Ver Andrián y Manzano (2023) para mayor detalle de los sectores seleccionados.

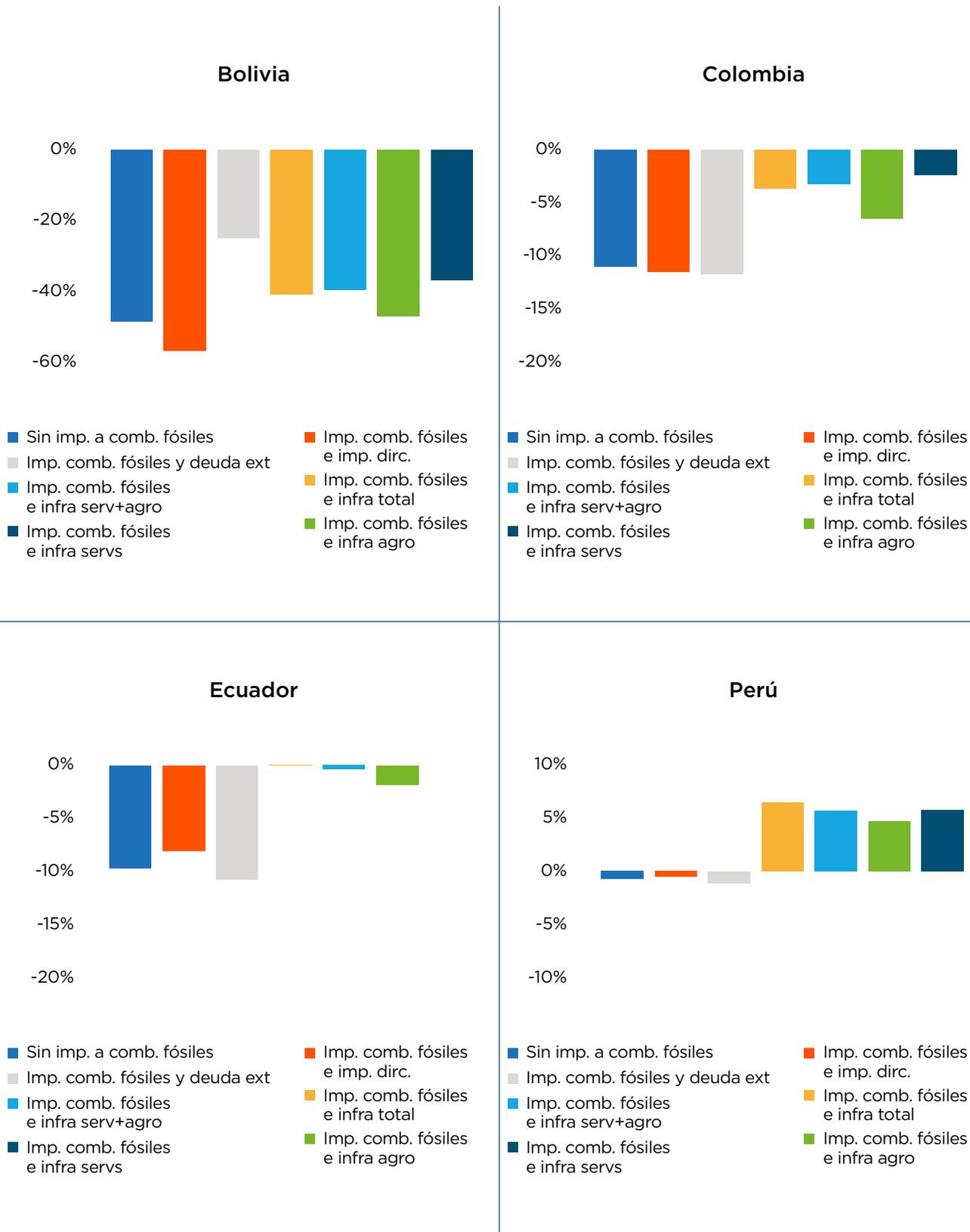
Gráfico 1.12. Programa de inversión pública en infraestructura adicional

Fuente: estimación propia.

Los *push* de inversión en infraestructura tienen efectos positivos sobre las economías andinas. Aunque con resultados heterogéneos, el *push* de inversión pública compensa los efectos adversos de la caída en el precio del petróleo y el impuesto a las emisiones. De hecho, en algunos casos como Perú, y en menor medida Ecuador y Colombia, las inversiones en algunos sectores son capaces de revertir completamente el efecto negativo que implica un escenario de descarbonización (ver los Gráficos 1.13 y 1.14) ¹². En el caso de Perú, al ser la economía con menor dependencia de la industria petrolera, el *push* de inversión genera un aumento en el PIB superior al escenario base en 5,6% en promedio para todos los escenarios. Por otro lado, los resultados de estos escenarios varían entre países en función de su estructura productiva y, en particular, de la importancia que tienen los sectores promovidos mediante la inversión pública en infraestructura en términos de importaciones y exportaciones. Por ejemplo, *ceteris paribus*, un sector con alta intensidad exportadora (es decir, un elevado ratio entre exportaciones y producción) puede incrementar su producción con reducciones relativamente menores de su precio. En general, este es el caso de la industria agroalimentaria en los países andinos. Por otro lado, promover, mediante inversiones en infraestructura básica, todos los sectores productivos tiene la ventaja de generar un crecimiento sectorialmente más balanceado. El caso de servicios incluye la promoción de los sectores de comercio y transporte que tienen efectos positivos que son transversales a toda la economía. En particular, se reducen los márgenes de comercialización y transporte con efectos positivos directos sobre el precio que pagan los distintos agentes (firmas y hogares) por los bienes que utilizan. El caso de Bolivia es particular, porque la inversión en infraestructura debe financiar con incrementos adicionales de impuestos. En cambio, los demás países reciclan la recaudación del impuesto al uso de combustibles fósiles para financiar la inversión en infraestructura.

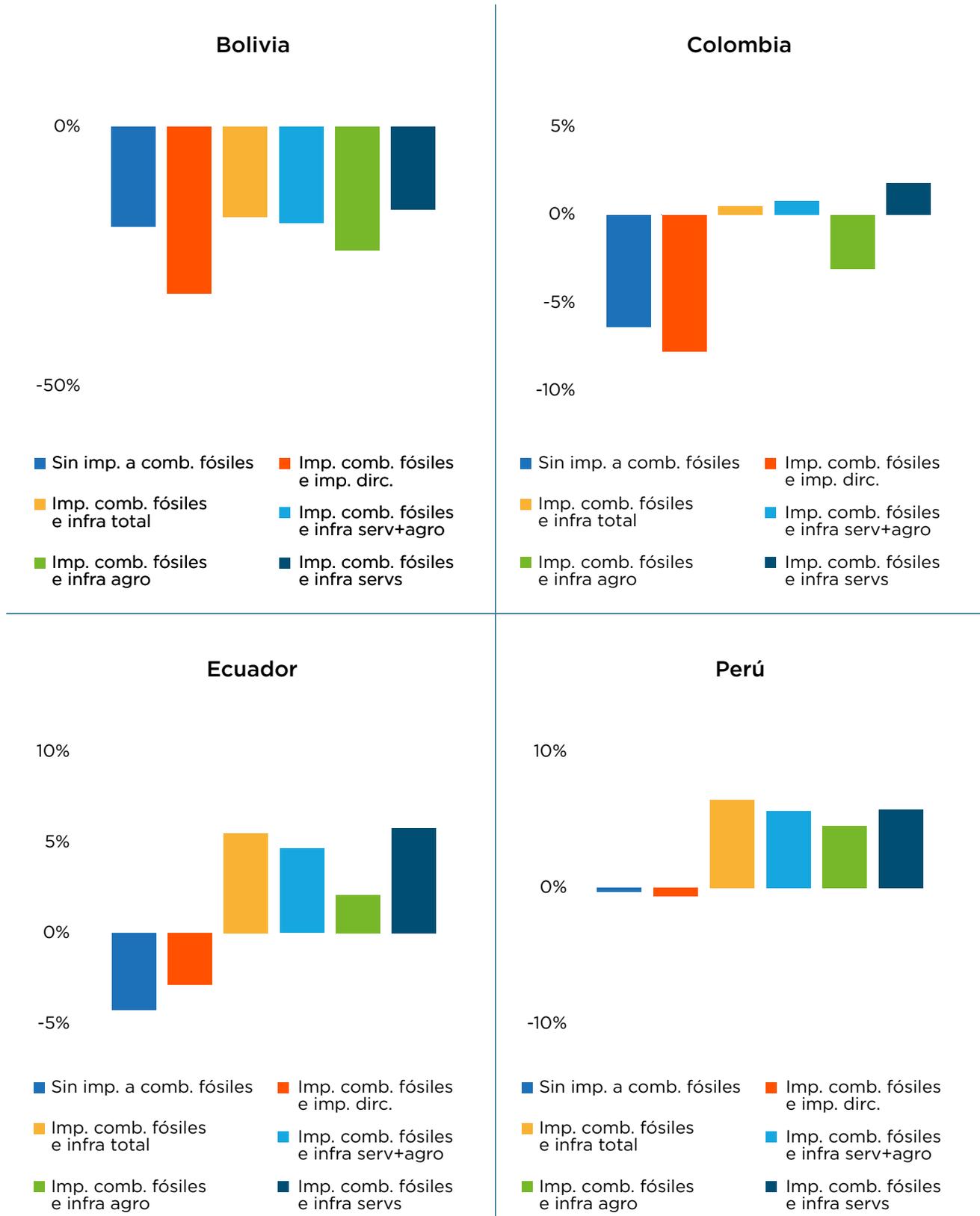
¹² Aunque no se muestran, los resultados para consumo, inversión y comercio exterior son consistentes y van en la misma dirección que los resultados del PIB.

Gráfico 1.13. Efecto en el crecimiento del *push* de inversión a 2050 (precio del petróleo USD 25/b)



Fuente: estimación propia.

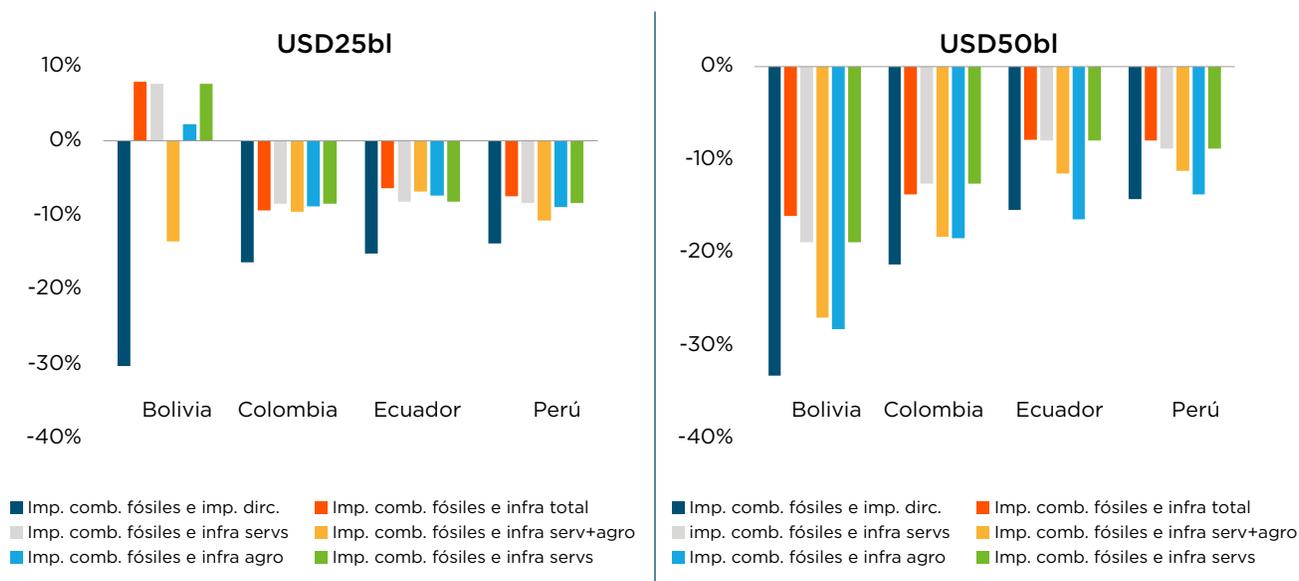
Gráfico 1.14. Efecto en el crecimiento del *push* de inversión a 2050 (precio del petróleo USD 50/bl)



Fuente: estimación propia.

La introducción de un impuesto al uso de combustibles fósiles reduce las emisiones de GEI en alrededor de un 30% respecto a escenarios donde no hay impuesto (ver el Gráfico 1.15). Sin embargo, su efecto se reduce cuando la recaudación adicional del impuesto a los combustibles fósiles es utilizada para financiar un incremento de la infraestructura básica destinada a la promoción de todos los sectores productivos o de sectores seleccionados. En este caso, el incremento del nivel de actividad económica que genera la inversión en infraestructura básica tiene un efecto positivo sobre el volumen de emisiones de GEI. En particular, cuando la inversión en infraestructura básica se focaliza en la promoción de sectores productores de servicios tales como transporte, se observan las reducciones menos importantes en las emisiones de GEI. El caso de Bolivia llama la atención, porque el incremento del nivel de actividad económica que genera la inversión en infraestructura básica combinado con una reducción en el precio mundial del petróleo tiene resultados contraintuitivos. Ello se debe a que en algunos casos el aumento del nivel de actividad económica junto con la importación de combustibles fósiles a bajo precio aumenta su uso.

Gráfico 1.15. Emisiones de GEI (desviación respecto al escenario sin impuesto al uso de combustibles fósiles)



Fuente: estimación propia.

1.7 Conclusiones

El proceso de descarbonización global impactará en las economías andinas debido a su dependencia de la industria hidrocarburífera. En economías donde el crecimiento se ve afectado por la extracción y exportación de hidrocarburos, los países andinos se enfrentan a un panorama desafiante, donde la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles implicará una caída en la demanda y precio de fuentes de energías fósiles. Lo anterior implica la necesidad de replantear la estructura de las economías, apalancando sectores con potencial de crecimiento y que sean capaces de diversificar la canasta exportadora.

Así, la dependencia de la industria hidrocarburífera en estos países crea desafíos económicos y estructurales. La reducción en la demanda de hidrocarburos afectará directamente los ingresos gubernamentales, el empleo y la inversión relacionados con la industria. Además, la interrelación entre el gobierno, el sector petrolero y la economía en general es un desafío hacia la transición de una economía baja en carbono.

Sin embargo, la descarbonización también presenta oportunidades para las economías andinas. La diversificación económica hacia sectores no relacionados con los hidrocarburos puede fortalecer la resiliencia económica y reducir la volatilidad asociada con los precios internacionales del petróleo. A su vez, el impulso hacia industrias como el turismo, la agricultura y los servicios modernos puede generar nuevas fuentes de empleo y contribuir a un crecimiento económico más equilibrado y sostenible.

Para lograrlo, se deben eliminar los cuellos de botella que representan un freno para la productividad agregada y para los sectores mencionados anteriormente (Andrián y Manzano, 2023). Por ejemplo, se necesita mejorar la calidad y dotación de la infraestructura (de la Cruz *et al.*, 2020). En este sentido, los escenarios simulados en este capítulo muestran que un *push* de inversión en infraestructura (financiado con impuesto al uso de combustibles fósiles) permite a los gobiernos hacerse de espacio fiscal para financiar infraestructura y reducir a la vez las emisiones de GEI potenciando el crecimiento. Existen otras políticas públicas que ayudarían a apalancar una mayor inversión en infraestructura para acelerar el crecimiento en la Región Andina (de la Cruz *et al.*, 2020) y otras que ayudan al proceso de descarbonización (Andrew, 2017), que están fuera del alcance de este estudio.

De igual modo, existen otros aspectos de la descarbonización no analizados en este estudio, pero que ameritan futura investigación.

En conclusión, el proceso de descarbonización global afectará de manera particular a las economías andinas debido a su dependencia de la industria hidrocarburífera. Si bien esto plantea desafíos económicos y estructurales, también brinda oportunidades para diversificar la economía, desarrollar energías renovables y promover un crecimiento sostenible. La transición hacia una economía baja en carbono requerirá una planificación estratégica, inversión y colaboración entre el gobierno, las empresas y la sociedad para garantizar un futuro más sostenible para las economías andinas.

CAPÍTULO 2.

IMPACTO ECONÓMICO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LOS PAÍSES ANDINOS

2.1 Introducción

Una de las principales consecuencias del proceso de descarbonización global es la necesidad de una transición energética hacia fuentes de energía más limpias y renovables. La reducción del uso de combustibles fósiles y la adopción de tecnologías limpias y sostenibles, como la energía solar, eólica, hidráulica y geotérmica, son fundamentales para alcanzar los objetivos de descarbonización global. Esta transición energética implica un cambio profundo en el modelo energético actual en los países andinos. Así, la planeación de la transición energética para lograr un sector bajo en carbono ha ganado importancia en las agendas nacionales. En este sentido, el punto de partida son los compromisos de descarbonización que la región ha ido adoptando en línea con la agenda internacional de evitar un aumento de la temperatura global superior a 2 °C. Colombia y Ecuador han manifestado su intención de alcanzar la carbononeutralidad para el 2050 —el primero a nivel de declaración y el segundo en un documento formal de política—, mientras que en Perú estos compromisos todavía están en discusión a nivel doméstico. Bolivia aún no tiene una meta establecida para el 2050¹.

Cumplir estas metas supone un esfuerzo considerable para los países andinos dadas las características de sus sistemas energéticos y las realidades de la economía en la que se encuentran inmersos. En primer lugar, se trata de economías que albergan a 160 millones de personas en condiciones de pobreza^{2, 3}. En segundo lugar, hay una marcada dependencia de los combustibles fósiles en la medida que dos terceras partes de la energía final consumida vienen del gas, el carbón y el petróleo (ver el Gráfico 2.1), proporción que además se ha mantenido casi inalterada en los últimos treinta años⁴. Esto último tiene importantes implicaciones fiscales (ver el Cuadro 1.1) en materia de equilibrio macroeconómico y financiación del

1 Para los países que tienen compromisos, estos se refieren a (i) las fechas y magnitudes de reducción de emisiones y (ii) las políticas y programas para hacerlos realidad. En ambos casos, hay brechas significativas en la región: organizaciones como Climate Action Tracker —que hace un análisis científico independiente sobre “el progreso hacia el objetivo acordado a nivel mundial de mantener el calentamiento muy por debajo de 2 °C y continuar los esfuerzos para limitar el calentamiento a 1.5 °C”— califican a la región entre insuficiente y críticamente insuficiente (ver <https://climateactiontracker.org/>)

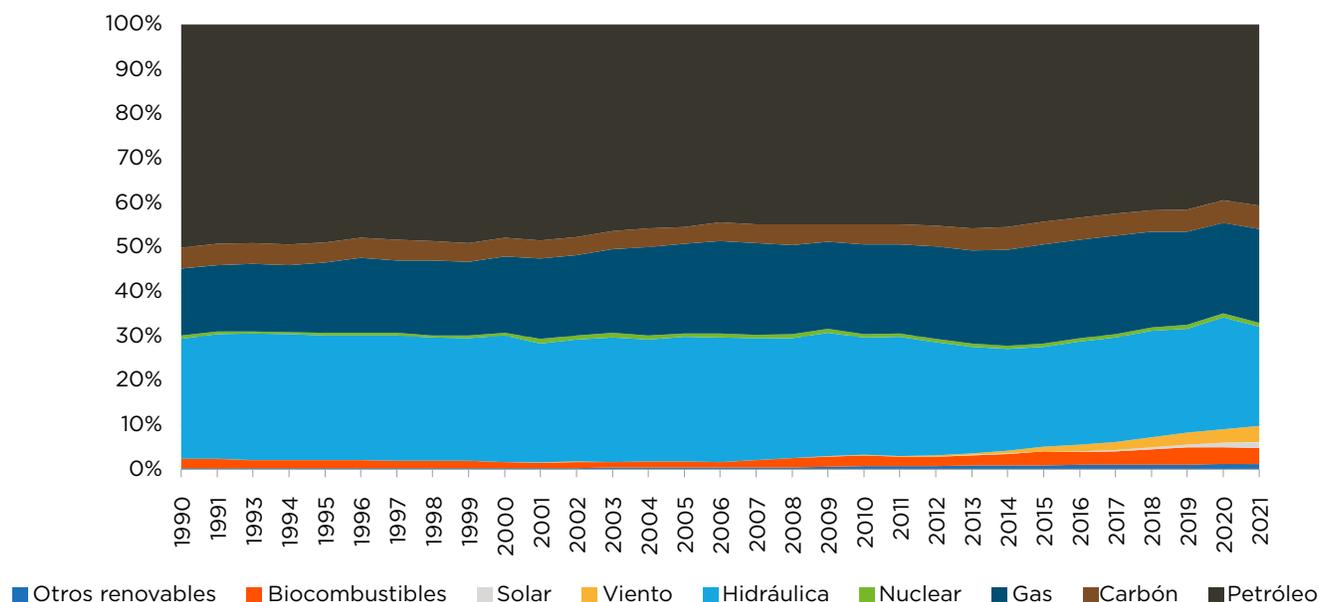
2 Cálculos propios con base en datos del Banco Mundial. La línea de pobreza es de USD 5 por día.

3 La descarbonización pone presión a las brechas sociales por diferentes caminos. Por un lado, porque cerrar brechas sociales supone grandes inversiones públicas cuya financiación depende significativamente en los países productores de los impuestos y regalías a los hidrocarburos y el carbón. También porque una transición energética que encarezca los fósiles respecto a las energías de bajas emisiones podría elevar el precio de la energía a los grupos más vulnerables, generar efectos distributivos adversos y aumentar el gasto público en aquellos países donde se subsidian los combustibles fósiles. Y finalmente, porque los grupos más pobres van a tener presión para poder financiar el cambio en equipos de consumo, como vehículos y electrodomésticos ineficientes.

4 Si bien la participación de los fósiles en el consumo de energía primaria se ha mantenido relativamente estable, ha habido una recomposición: el gas está ganando participación a costa del petróleo.

gasto (Andrián *et al.*, de próxima publicación). Valoradas a precios de hoy, las reservas fósiles de la región permitirían, por ejemplo, pagar 8 veces la deuda bruta o pagar 18 años de gastos del gobierno⁵.

Gráfico 2.1. Consumo de energía primaria en ALC



Fuente: Our World in Data y cálculos propios.

Cuadro 2.1. Ingresos fiscales por la explotación hidrocarburífera como % del PIB (promedio 2010-2018)

| | |
|-----------------|------|
| Bolivia | 9.7 |
| Colombia | 2.9 |
| Ecuador | 10.8 |
| Perú | 1.5 |

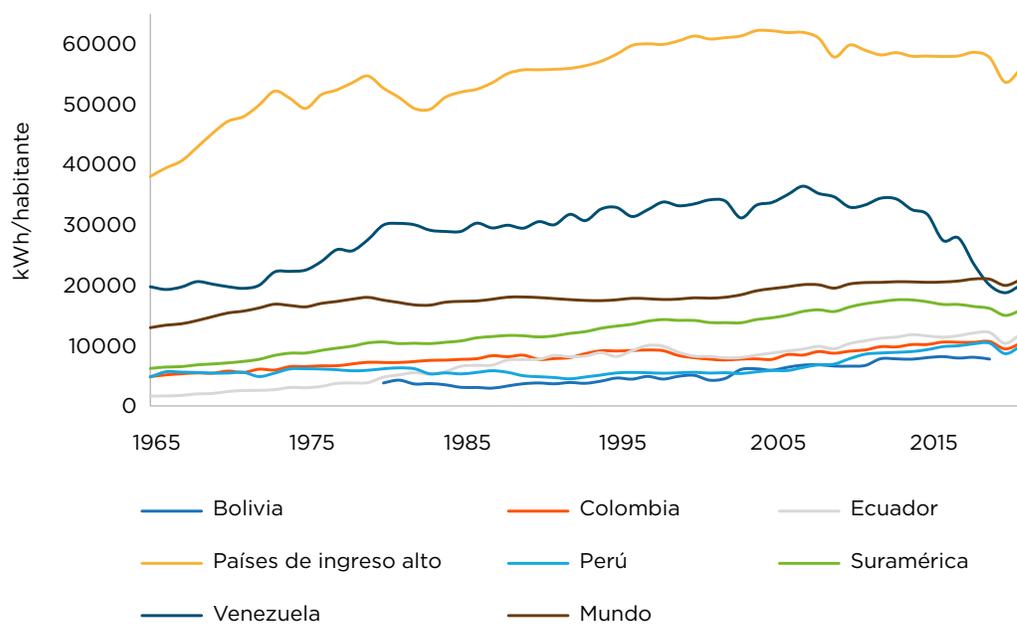
Fuente: CEPAL.

Nota: extracción y comercialización de hidrocarburos.

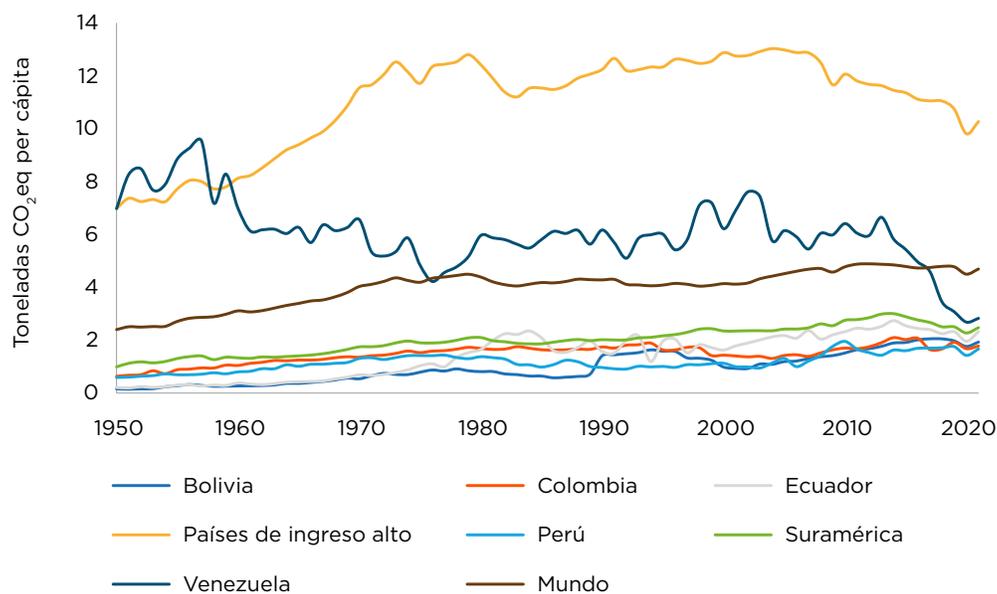
Finalmente, se trata también de países con bajos niveles de consumo de energía y de emisiones por persona. En el caso del primero, los cuatro países andinos consumen, en promedio, la mitad de la energía per cápita que el promedio mundial y seis veces menos que los países de ingresos altos (ver el Gráfico 2.2). El caso de las emisiones es similar (ver el Gráfico 2.3), con crecimientos sostenidos de las emisiones en el último medio siglo, pero también con niveles muy inferiores al promedio mundial, al regional y al de los países de ingresos altos.

⁵ Cálculos a partir de datos de BP Statistical Review of World Energy. Aun sin Venezuela, que concentra la mayor parte de las reservas, estas superan con creces para el resto de los países —incluidos los no productores— el recaudo o el gasto de un año.

Gráfico 2.2. Consumo de energía per cápita



Fuente: Our World in Data.

Gráfico 2.3. Emisiones per cápita de CO₂

Fuente: Our World in Data.

La combinación de estos tres elementos —espacio fiscal para cerrar brechas sociales, dependencia energética y fiscal de los fósiles, y bajo consumo de energía— hace que la transición energética imponga grandes retos a la política pública de los países andinos. Por un lado, porque si quieren descarbonizarse garantizando que pueden contar con la generación de energía necesaria para no frenar su desarrollo, deben asegurar que esta provenga de fuentes de bajas emisiones sin sacrificar ni la asequibilidad ni la seguridad en el suministro.

Por otro lado, porque los cambios en la matriz energética requerida para la carbononeutralidad van a tener consecuencias sobre la estructura general de la economía. Primero, debido a que la transición energética supone que los sectores productivos deben cambiar sus equipos y procesos logísticos para consumir energía de bajas emisiones, lo que a su vez implica aumentos de inversión, cambios en el empleo y necesidades de financiamiento que deben ser atendidas. Segundo, porque la transición marchitaría los sectores que dependen directa e indirectamente de la producción de combustibles fósiles. Y tercero, porque la transición requiere de la adopción de nuevas tecnologías como el hidrógeno, las baterías o la captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) que en sí mismas pueden generar cambios en el empleo, la inversión y el consumo intermedio.

En este capítulo se exploran los requerimientos de cambio en la matriz energética⁶. Así, se modelan escenarios de futuro energético que permitan entender la evolución que debe tener el sector energético bajo diferentes condiciones de descarbonización. De esta manera, se analizan los principales resultados de un conjunto de escenarios de transición energética modelados para cuatro países de la Región Andina: Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, que han venido formulando estrategias con diferentes grados de ambición en sus objetivos y en los mecanismos planteados para lograrlos. Finalmente, se presentan las principales recomendaciones a partir del análisis realizado.

6 Cabe señalar que de acuerdo con el índice de transición energética ETI calculado por el Foro Económico Mundial para 115 países, los cuatro países andinos son más fuertes en la dimensión de desempeño de su sistema energético que en la del grado de preparación para la transición (Foro Económico Mundial 2021). No obstante lo anterior, en materia de preparación, todos salvo Bolivia están por encima del promedio mundial en ambas dimensiones. Esto enfatiza la necesidad en los cuatro países de elevar la capacidad de la economía para hacer la transición sin desmejorar la funcionalidad del sistema para proveer energía.

2.2 Escenarios de transición

Los cuatro países andinos analizados coinciden en contar con una abundancia relativa de distintos combustibles fósiles; en el aporte que hacen a la economía la explotación y exportación del recurso fósil abundante (gas en el caso de Bolivia y Perú, y petróleo en el caso de Ecuador y Colombia, junto con carbón en este último) y la necesidad de apalancar un desarrollo económico que permita atender las necesidades de la aún significativa fracción de la población que todavía no tiene acceso a la energía limpia, asequible y confiable y de aquella que aún no ha superado la pobreza. Considerando lo anterior, se han construido y modelado tres escenarios de evolución del sector energético para identificar los principales requerimientos y características (técnicas, de requerimientos de inversión y costos) del sector.

La evaluación de los escenarios de cada país se llevó a cabo utilizando las herramientas de modelaje disponibles y desarrolladas en cada uno de ellos. Por este motivo, los enfoques de modelamientos varían entre países aunque se parte de una base de supuestos de modelamiento común. De este modo, los resultados para Bolivia y Perú se obtuvieron a partir de modelos de contabilidad, mientras que los resultados para Colombia y Ecuador se obtuvieron a partir de modelos de optimización. Los primeros dependen altamente del criterio experto del modelador para identificar las estrategias y cambios a ser implementados asegurando el mayor grado posible de consistencia temporal y factibilidad en los escenarios modelados. Por otro lado, los modelos de optimización toman las decisiones de inversión y de los cambios requeridos bajo un criterio matemático. En este segundo caso, las soluciones de mínimo costo obtenidas deben pasar por el cedazo de ajustes para que, a juicio del modelador, adquieran un grado de realismo (teniendo en cuenta que las soluciones óptimas a veces requieren cambios de muy difícil implementación práctica).

Se modelaron para todos los países tres escenarios para los que se definieron supuestos de entrada consistentes entre sí y que pueden formar parte de la misma narrativa del escenario. Así, cada país tiene un modelo en el que la base tecnológica y las particularidades del sector quedan reflejadas y se evalúan escenarios en donde los precios internacionales de la energía, la evolución de los costos de las tecnologías y los niveles de ambición climática locales y globales son comunes a todos los países, y la senda de crecimiento económico (de cada país) fue estimada para ser consistente con los tres supuestos mencionados anteriormente. A continuación, se describen las variables que conforman los distintos escenarios.

- › **Precios internacionales del petróleo, gas natural y carbón.** Las trayectorias de precios fueron tomadas del *World Energy Outlook 2021* de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés). Se actualizaron las trayectorias modificando los valores de los primeros años en función del histórico, y se usaron transiciones más suaves para convergir a los valores de 2050 presentados por la IEA (ya que solo presenta valores en 2020, 2030 y 2050).
- › Se compartió un supuesto común sobre la razón de aprendizaje tecnológico y economías de escala que inciden en **la reducción del costo de capital de las tecnologías para la transición energética:** solar fotovoltaica, eólica *onshore* y *offshore*, baterías para aplicaciones estacionarias de generación eléctrica, vehículos híbridos, vehículos eléctricos con batería, células de combustible en vehículos de carga, y electrolizadores para producción de hidrógeno. Estas trayectorias fueron construidas a partir de datos de IEA (2021).

- › **Escenarios de emisión de gases de efecto invernadero.** Se definieron tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) por quema de combustibles con fines energéticos. En primer lugar, se consideró un escenario en el que se implementan los cambios referentes a las políticas anunciadas en materia de cambio técnico o de restricción de emisiones locales. En segundo lugar, se exploró un escenario en el que las emisiones del sector se reducen hasta acercarse a la carbononeutralidad en 2050. Finalmente, se evaluó la posibilidad de alcanzar la carbononeutralidad un par de décadas después (2070).
- › **Producto interno bruto (PIB).** Para cada escenario, se calcularon trayectorias de PIB nacionales y sectoriales, usando un modelo de equilibrio general computable⁷ (EGC) que tuvo en cuenta la trayectoria del precio del petróleo en los tres escenarios descritos por el *World Energy Outlook 2021*.

Los tres escenarios modelados pueden definirse a partir de las tres sendas de emisión descritas anteriormente. A cada escenario (que corresponde a una senda de emisión) se le asoció una realización de evolución de los precios internacionales de la energía, de las tecnologías y un escenario base de crecimiento económico. De esta manera, se construyeron tres escenarios, que se describen a continuación y que están inspirados en los escenarios formulados por IEA (2021).

- › **Políticas anunciadas.** Está inspirado en el escenario “Compromisos anunciados” (APS, del inglés *Announced Pledges Scenario*) de la IEA (2021), que supone que todos los compromisos climáticos asumidos por los gobiernos de todo el mundo, incluidas las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) y los objetivos de cero emisiones netas a largo plazo, se cumplirán en su totalidad y a tiempo. En el caso de los países de la región, este escenario supone que las políticas de reducción de emisiones (promoción a las energías renovables, electromovilidad, eficiencia energética, por ejemplo) y los anuncios internacionales en materia de mitigación (estrategias de largo plazo y contribuciones nacionalmente determinadas) se cumplen. Estos escenarios difieren significativamente, según los anuncios de cada país. Por ejemplo, para Ecuador es un escenario que podría calificarse de *business as usual* en cuanto a la emisión de GEI y en Colombia, el cumplimiento de los anuncios implicaría lograr la carbononeutralidad a mitad de siglo.
- › **Energía para cero emisiones netas en 2070.** Está inspirado en el escenario “Desarrollo Sostenible” (SDS, en inglés *Sustainable Development Scenario*) de IEA (2021), que logra que, en el largo plazo, se cumplan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas relacionados con energía, es decir, el acceso universal a la energía y las principales mejoras en la calidad del aire. En este escenario, se alcanzarían las emisiones globales de CO₂ cero netas máximo en el 2070. La definición de cero emisiones netas varía según el criterio de los expertos de cada equipo nacional en cuanto al nivel de compensaciones provenientes de otros sectores que podría esperar el sector energético.
- › **Energía para cero emisiones netas en 2050.** Está inspirado en el escenario “Cero Emisiones Netas a 2050” (NZE, en inglés *Net Zero Emissions by 2050*) de IEA (2021), que establece un camino estrecho pero alcanzable para que el sector energético mundial logre los ODS relacionados con energía (antes mencionados), y alcance las emisiones globales de CO₂ cero netas máximo hasta 2050. Este es el escenario más ambicioso de descarbonización.

⁷ Ver el capítulo 1 para una mayor descripción del modelo EGC.

2.3 Emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energético

A continuación, se presentan los principales resultados de la modelación realizada. En primer lugar, se describe la trayectoria de emisiones del sector energía y la distribución de esas emisiones entre los subsectores energéticos. Luego, se presentan los resultados del consumo energético resultante; y finalmente, se presenta la conformación de la generación eléctrica al ser este uno de los sectores que más cambios presenta en los diferentes escenarios.

Como se mencionó anteriormente, los países de la Región Andina tienen una abundancia relativa, aunque diferenciada, de recursos energéticos. Mientras que al norte de la región el petróleo le ha permitido a Colombia y Ecuador ser exportadores de este recurso, al sur el gas natural ha cumplido este papel en Perú y Bolivia.

Bolivia es un exportador neto de energía a nivel regional, debido a sus reservas de gas natural. El sector energético es el segundo mayor contribuyente a las emisiones totales de gases de efecto invernadero en Bolivia después del sector UTCUTS⁸ (uso de la tierra y cambios del uso de la tierra y silvicultura). El pico de producción de energía primaria se registró en 2014 y alcanzó los 150 millones de barriles de petróleo equivalente (MMbep); en ese mismo año, las exportaciones de Gas Natural (GN) fueron más altas. Estas exportaciones están disminuyendo actualmente debido al agotamiento de las reservas de gas natural. En 2020, las exportaciones de GN representan el 60% de la producción nacional de energía. En general, el GN representa un total del 80,2% de la producción nacional de energía primaria. El resto de la producción de energía primaria se atribuye a derivados del petróleo (12,4%) y energías renovables (7,4%). El consumo total de energía en 2020 en Bolivia fue de 43 MMbep, de los cuales 24,2% corresponden al diésel, 22,0% al GN, 29,4% a la gasolina y otros combustibles pesados, 12,4% a la biomasa y finalmente, 12% a la electricidad. Cuando se expresa por sectores, para el 2020, el sector transporte fue el principal consumidor de energía en Bolivia con una participación del 49,0%, seguido de la industria con 25,3%, residencial con 17,3%, y de comercio y servicios con 3,8%. En 2020, el sistema de generación de energía eléctrica en Bolivia tenía una capacidad instalada total de 3.318 MW. Esta capacidad estaba compuesta en un 72,8% por centrales térmicas, principalmente GN de ciclo simple (vapor) y de ciclo combinado, y el 27,2% por plantas renovables, principalmente hidroeléctricas, y pequeñas plantas de energía eólica y solar. Para el mismo año se generó un total de 8.897 MW h, de los cuales el 63,3% fue provisto por plantas de GN convencionales, el 32,3% fue proporcionado por centrales hidroeléctricas y el resto, por una mezcla de plantas de energía solar, eólica y de biomasa.

En Colombia, el mayor consumo de energía lo hace el sector transporte con derivados de petróleo y gas natural que representan la mitad de su consumo de energía final. Hay una participación menor de biocombustibles como resultado de una mezcla obligatoria con el diésel y la gasolina que se usa en ese sector. El país ha mantenido en las últimas décadas un perfil exportador de petróleo y este recurso energético representa hasta el 40% de las exportaciones de Colombia y hasta el 3,3% del PIB. El carbón, que es el más abundante de los recursos energéticos fósiles del país, también tiene un papel predominante en las exportaciones nacionales y se usa para la industria y, en menor medida, en la generación eléctrica. Por último, el gas natural fósil, gracias a un plan de masificación, se ha convertido en uno de los principales combustibles en el sector residencial, ha logrado desplazar al carbón y a otros combustibles líquidos en las industrias y es el principal combustible fósil usado para la generación termoeléctrica. Además de

⁸ Se trata básicamente de la conversión del uso del suelo, pasando hacia bosques. Por ejemplo, de pasturas a bosques, de cultivos a bosques; en otras palabras, reforestación y regeneración.

la mezcla obligatoria de biocombustibles con los fósiles líquidos para transporte, el gran espacio de las energías renovables en Colombia está en la generación de electricidad. Aunque la generación actual con energía eólica o solar es marginal, la hidroelectricidad es responsable de la producción de más del 80% de la electricidad consumida en el país en épocas normales. En cuanto a GEI, la producción y uso de energía en Colombia fue responsable del 33% de las emisiones netas del país en 2018, con un crecimiento del 85% con respecto a los niveles de 1990. En contraste, el sector UTCUTS, que es el principal emisor en Colombia, redujo un 2% sus emisiones en 2018 con respecto a 1990.

En Ecuador, la producción de petróleo en 2020 alcanzó los 175 millones de barriles (MMbbls), con un decremento de 9,5% respecto al año anterior, explicado por paralizaciones en el sistema de transporte de crudos y restricciones de producción asociadas a la pandemia del COVID-19. En el mismo año, la exportación de petróleo se redujo en un 7,7% con respecto al año previo. En 2020, el PIB sectorial de la industria petrolera contribuyó en 9,6%. Al finalizar 2021, el país contaba aún con un total de reservas (3P) de 2.061 MMbbls de petróleo, y de 425.794 MMSCF de gas natural. Los combustibles fósiles han sido los energéticos de mayor requerimiento en el país, con una participación promedio de 81% entre 2010 y 2020 en la matriz de demanda final de energía. La electricidad corresponde al 19% de la demanda nacional de energía. El sector transporte es el de mayor demanda energética; antes de la pandemia este sector respondía por 48%-50% de la demanda nacional; en 2020, respondió solo por 45%. Luego de transporte, los sectores de mayor demanda son industria (17%) y residencial (16%). El gas es la principal fuente de energía para aplicaciones de cocción en los sectores residencial y comercial. Los biocombustibles desempeñan un rol menos importante, solamente en una región del país se comercializa una gasolina que contiene un 5% de etanol. Las energías renovables tienen un potencial importante en Ecuador, especialmente para la generación de electricidad. En 2020, el índice de renovabilidad en la matriz energética nacional fue de 19,8%. Este mismo índice, en términos de generación eléctrica en el Sistema Nacional Interconectado (SIN), fue de 91,2%. El país cuenta con un gran potencial hidroeléctrico en la cuenca amazónica, con un importante potencial eólico, de residuos de biomasa, de geotermia, y de solar fotovoltaica a nivel nacional, que permitirían a Ecuador alcanzar metas de descarbonización.

En Perú, el sector energía es el segundo sector de mayor contribución nacional de GEI, con un total anual de 58.13 Mt. CO₂eq⁹ (MINAM, 2020). Este sector se caracteriza por ser un fuerte consumidor de combustibles fósiles y por tener una limitada oferta primaria y secundaria de energías renovables no convencionales. La oferta de energía primaria de yacimientos de fuentes fósiles y minerales representaron un 79,2% del total de energía primaria, el 20,8% restante correspondió a recursos naturales renovables (MINEM, 2020). Actualmente, Perú es importador de petróleo y carbón mineral, y tiene una balanza comercial de energéticos primarios deficitaria. La oferta interna de energía secundaria en el año 2019 estuvo constituida en 74,7% de hidrocarburos, 24,4% de electricidad y 0,9% de carbón y derivados. Se reporta que la actividad de extracción de petróleo crudo, gas natural y servicios conexos representaron un 1,9% del PBI real. En su gran mayoría, los energéticos de origen fósil son consumidos por el sector transporte, residencial e industrial, o son exportados. La generación de energía eléctrica ha tenido un importante crecimiento y se caracteriza por ser mayoritariamente de origen renovable. Esta es producida por dos energéticos principalmente: gas natural y energía hidráulica y, en menor cantidad, por las fuentes renovables no convencionales que cubren cerca del 5% de la producción nacional de energía eléctrica cada año. El gas natural también ha tenido un importante crecimiento y se considera que podría tener un papel relevante en

9 Millones de toneladas de CO₂ equivalente.

el futuro energético peruano por su contribución como energía firme¹⁰. Los centros de transformación y tratamientos de hidrocarburos se han estado modernizando; junto con la integración de los biocombustibles a la matriz energética tienen la finalidad de entregar combustibles de calidad y amigables con el medioambiente conforme a las políticas nacionales. Las fuentes renovables no convencionales se están expandiendo, integrando tecnologías como geotérmica, biomasa, eólica y solar a la matriz energética. El aprovechamiento de este potencial energético, en especial de las energías renovables, permitirá cumplir con los objetivos climáticos trazados por el Perú.

2.4 Emisiones

El Gráfico 2.4 presenta la composición de las emisiones del sector energético desagregadas por categoría. Lo primero que se puede observar, al comparar entre países, es que el escenario “Políticas anunciadas” lleva a aumentos significativos en las emisiones en todos los países, excepto en Colombia. Este aumento en las emisiones se da a pesar de las transformaciones que se tienen en los diferentes escenarios y que, de no darse, resultarían en crecimientos aun mayores de sus emisiones. De los cuatro países analizados, Colombia es el único cuyo escenario “Políticas anunciadas” llega a tener una tasa anual promedio de crecimiento de sus emisiones negativa. Este resultado se debe a que Colombia ha anunciado, y ratificado mediante ley, su compromiso de alcanzar la carbononeutralidad en 2050 y este compromiso fue modelado como componente del escenario. Sin embargo, a pesar de trazarse esa meta nacional, los programas y acciones específicos para lograr ese objetivo aún resultan insuficientes. Para el caso colombiano, el modelo identificó una composición del sector energético que permitiría, al menos técnicamente, lograr la carbononeutralidad a mitad de siglo. Se verificó que las acciones formuladas y los objetivos sectoriales vigentes son insuficientes para lograr la carbononeutralidad (por ejemplo, las metas de electrificación del transporte o de las edificaciones), siendo que la restricción de emisiones que se usó para representar el objetivo anunciado siempre fue activa en ese escenario.

En el caso boliviano, el escenario “Políticas anunciadas” lleva a que las emisiones en el país aumenten más del 100% entre 2020 y 2050. En ese país, las políticas anunciadas sobre el tema de descarbonización (hasta el año 2020) han estado enfocadas fundamentalmente en cambiar la matriz de generación del sector eléctrico. En Bolivia, la electricidad representa un 12% del consumo total de energía, por lo que su impacto a nivel del consumo y la reducción de emisiones de todo el sector, si bien es importante, aún es pequeña cuantitativamente¹¹. En Ecuador, el escenario “Políticas anunciadas” conduce a una ralentización del crecimiento de las emisiones de GEI en el mediano plazo, pues el escenario supone la consecución de los NDC incondicionales con metas en 2025, y la ejecución del Plan Maestro de Electricidad (caso base) con metas a 2028. No obstante, luego de 2030, debido a la ausencia de política sectorial de largo plazo y a la decisión por mínimo costo, el sector eléctrico vuelve a usar en su expansión a centrales térmicas fósiles, lo que provoca nuevamente el crecimiento de las emisiones de GEI hasta 2050, cuando alcanza un valor superior al año base. Cualquier incremento en el consumo eléctrico en el sector transporte exacerba el problema en el sector eléctrico. Para el caso peruano, las emisiones en el escenario “Políticas anunciadas”

¹⁰ Energía firme es la energía en un sistema eléctrico que está garantizada en todo momento del día o del año independientemente de las condiciones climáticas.

¹¹ En 2022, el Gobierno boliviano ha presentado oficialmente las NDC, donde ya se vislumbran nuevos compromisos como la electrificación del transporte, la hibridación de sistemas aislados (para reducir consumos de diésel), la producción de biocombustibles y otras varias medidas.

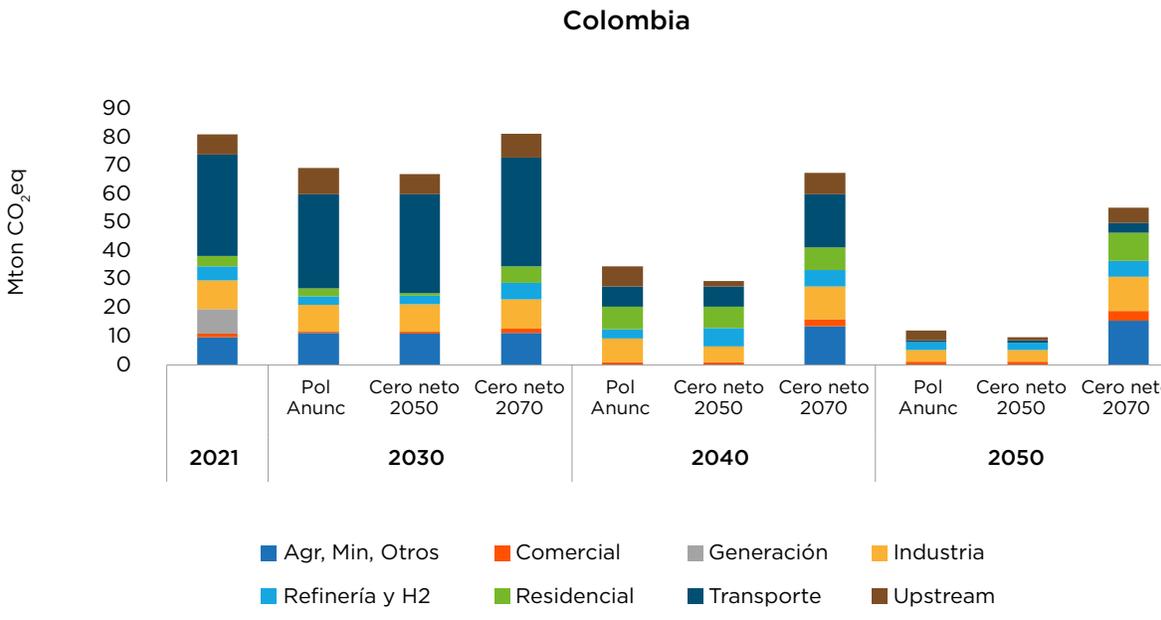
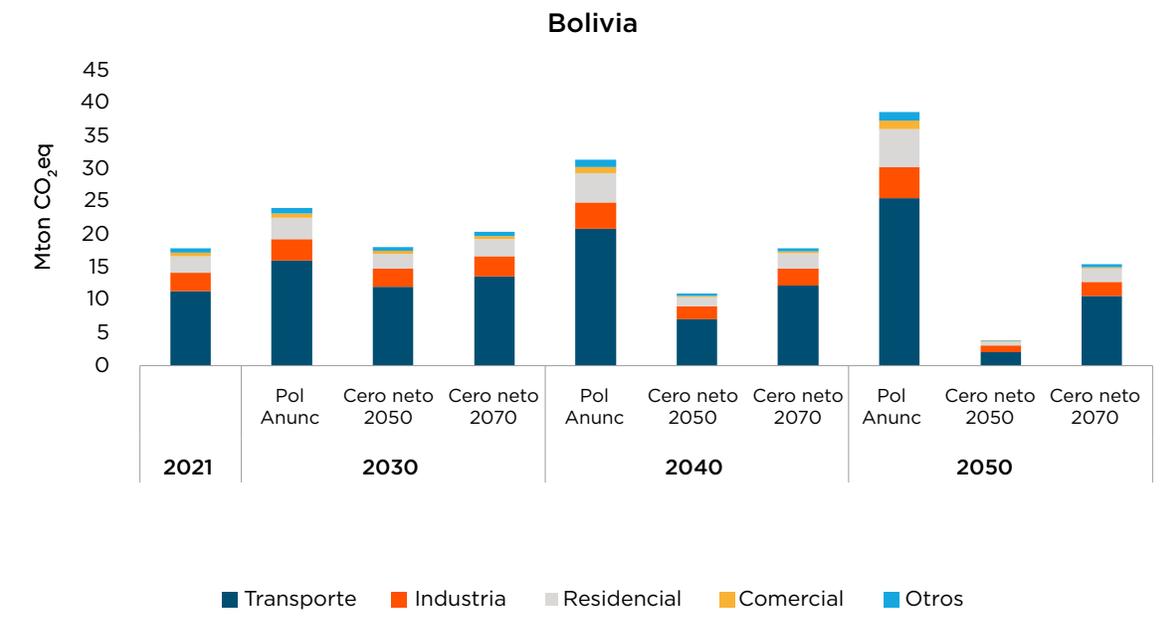
también aumentan, aunque lo hacen a una tasa menor que la del crecimiento económico, mostrando que los compromisos actuales no llegarían a una reducción absoluta de las emisiones, mas sí a un desacople entre el crecimiento económico y el de las emisiones.

El crecimiento de las emisiones en Bolivia, Ecuador y Perú en el escenario “Políticas anunciadas” se debe, en gran medida, al sector transporte, mientras que en Colombia ese sector debería lograr una disminución importante de sus emisiones ya en 2030 para habilitar el cumplimiento del compromiso de la NDC a mínimo costo.

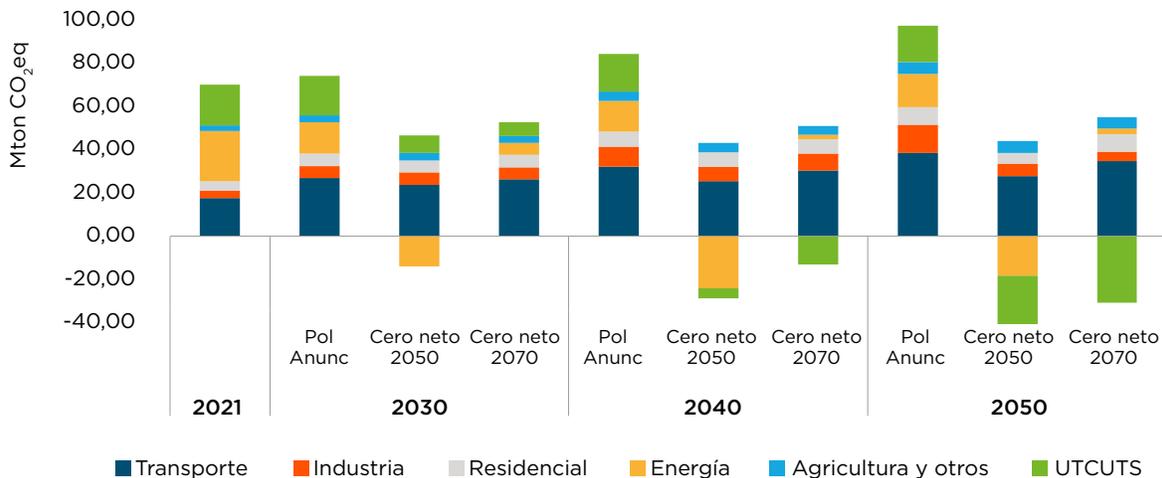
En general, se identificaron en los países bajo estudio conformaciones de canastas energéticas que permitirían disminuir sus emisiones para dar cumplimiento al objetivo de carbononeutralidad en 2050, considerando la posibilidad de lograr compensaciones en otros sectores (como el forestal). En particular, los resultados de Ecuador muestran que en 2050 se requerirían compensaciones de los sectores de suelos y forestal que ascenderían a entre 40% y 60% de las emisiones totales del sector energía (incluyendo transporte) respecto a 2020, dependiendo del escenario usado. En el caso de Ecuador, gracias al modelo integrado utilizado, se ha podido verificar la profunda relación entre las metas de descarbonización del sector energía y forestal. Dependiendo del nivel de reforestación modelado, los resultados en energía cambian considerablemente para alcanzar el cero neto en el largo plazo. Por ejemplo, si la reforestación es mínima, el sector energía hace un mayor esfuerzo al desarrollar tecnologías de CCS y más bioenergía. En todo caso, el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2070” muestra que en 2050 las emisiones brutas del sector energético deberían ya ser inferiores a las del año base (en contraste con lo que ocurre en el escenario “Políticas anunciadas” de Bolivia, Ecuador y Perú).

Las emisiones del sector transporte también tienen comportamientos distintos entre los países estudiados. Por un lado, está Ecuador, donde para 2050 las emisiones del sector transporte se estimaron mayores a las del año base en todos los escenarios. Por el otro lado, está Colombia, donde las emisiones del sector transporte en 2050 disminuyen sustancialmente, comparadas con las del año base en todos los escenarios. Este resultado es interesante habida cuenta de que esos países son los que usaron herramientas de optimización para el análisis de los escenarios. Es decir, para sus respectivos países los resultados presentados son los que minimizan el costo total o los que maximizan el bienestar de la sociedad. En el medio están los resultados de Bolivia y de Perú. En esos dos países, las emisiones del transporte son mayores o menores con respecto al año base según se esté en el escenario “Políticas anunciadas” o en el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2070”, y son nulas si se está en el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2050”.

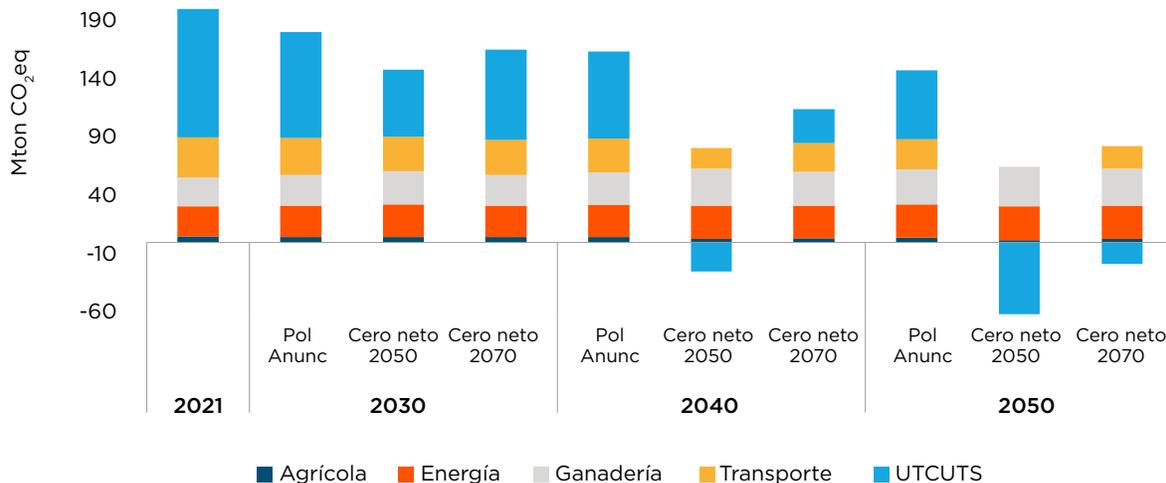
Gráfico 2.4 Emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energético



Ecuador



Perú



Fuente: elaboración propia.

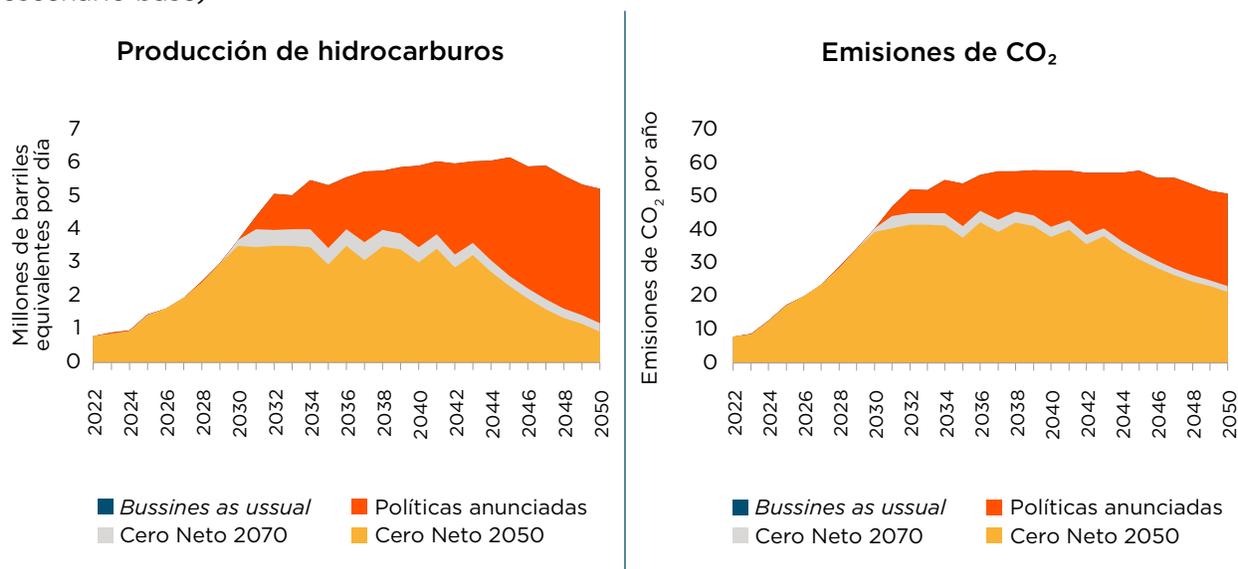
Nota: para Ecuador y Perú incluyen UTCUTS: uso de la tierra y cambios del uso de la tierra y silvicultura.

Recuadro 2.1. El caso de Venezuela

Analizar la matriz energética de Venezuela presenta desafíos debido a la escasez de disponibilidad de información estadística relevante para analizar la transición energética. En este sentido, no es posible realizar un estudio comparable con lo presentado para el resto de los países en este capítulo. Por otro lado, se considera que el sector petrolero puede fungir como el principal motor para la recuperación económica y el desarrollo de otros sectores que permita al país retornar a una senda de crecimiento sostenible y sustentable. Así, a manera ilustrativa, en este apartado se presentan simulaciones de diferentes trayectorias de recuperación de la producción de hidrocarburos ante los escenarios de descarbonización global seleccionados, y se analiza el comportamiento de las emisiones de GEI correspondientes.

Las simulaciones en este apartado parten del supuesto de que la industria petrolera opera en un entorno sin restricciones internacionales, la introducción de un marco fiscal que favorece la inversión extranjera en el sector, y que dicho marco se ajusta con base al nivel de precios internacionales. El Gráfico 1 muestra los resultados de los perfiles de producción de petróleo y gas asociado en millones de barriles equivalentes, y las emisiones de CO₂ correspondientes. Se puede apreciar el crecimiento de la producción a niveles de finales de la década de 1990 y principios de la década del 2000. Los escenarios *business as usual* y "Políticas anunciadas" reflejan el mismo resultado. El Gráfico 1 también muestra las emisiones de CO₂ asociados con estos escenarios.

Gráfico 1. Indicadores macroeconómicos Bolivia 2050 (cambio porcentual respecto al escenario base)



Fuente: elaboración propia.

Las emisiones de CO₂ se estiman a partir de las actividades de producción, que incluye la extracción, venteo y quema de gas. También, incorpora el transporte para venta y actividades de refinación. Las emisiones aumentan en la medida que las inversiones desarrollan capacidades de producción y refinación. Además, se considera que la totalidad de las emisiones de CO₂ causadas por la actividad extractiva es inyectada *in situ*, de manera que la inversión en exploración y desarrollo incorpora la perforación de pozos, ductos y plantas de tratamiento. El Cuadro 1 presenta la distribución de las emisiones por escenario y actividad en porcentaje.

Cuadro 1 Distribución porcentual de emisiones de CO₂ por escenario y actividad

| Escenario/ actividad | Distribución porcentual de emisiones por escenario y actividad | | | |
|---------------------------------|--|--------|------------|------------|
| | Extracción | Venteo | Transporte | Refinación |
| Cero neto 2050 | 35 | 11 | 4 | 49 |
| Cero neto 2070 | 39 | 10 | 5 | 46 |
| Políticas anunciadas | 57 | 7 | 7 | 29 |
| <i>Business as usual</i> | 59 | 3 | 7 | 31 |

Fuente: elaboración propia.

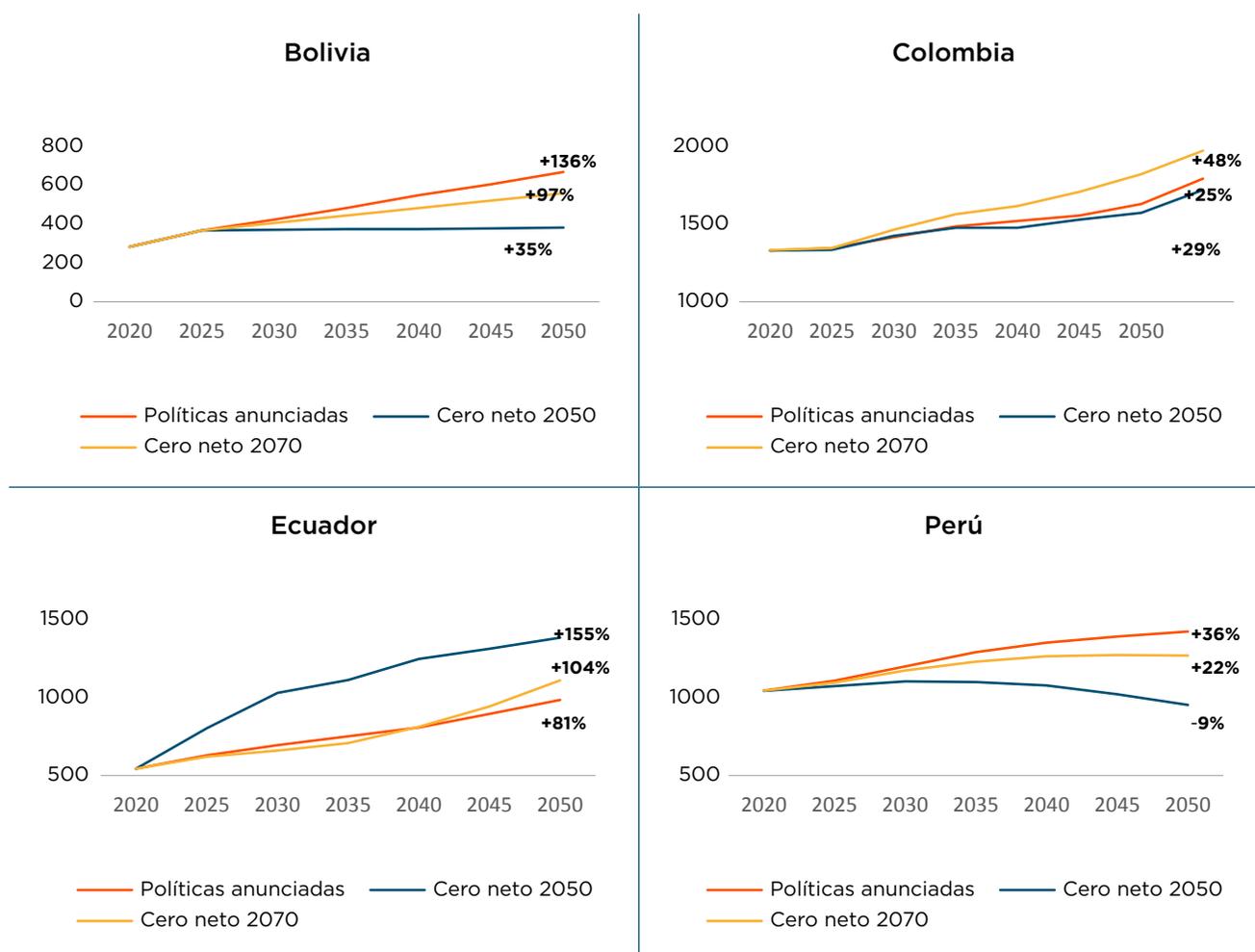
En Venezuela, a medida que la actividad petrolera se incrementa, crece con ella la actividad en general. Estimula el crecimiento del parque automotor y en consecuencia, la demanda de combustibles para transporte y la generación de energía. Existe la oportunidad de incorporar nuevos vehículos en Venezuela y hacer migrar de un parque automotor obsoleto a un parque automotor moderno en el que predominen los vehículos eléctricos. Así, se estima que para sustituir el parque automotor a combustión se requerirá invertir en aumentar en más de un 150% la capacidad de generación instalada destinada a sufragar las demandas de los sectores industrial y residencial.

Los diferentes escenarios de transición energética permiten ver las diferentes ventanas de oportunidad para el país, y también abren la inquietud de crear un sector energético que soporte, por ejemplo, un sector manufacturero que produzca los bienes con una mínima huella de carbono. Es también pertinente mencionar que, en su historia, Venezuela ha producido más de 80 mil millones de barriles, que podrían representar depósitos que están disponibles para el almacenamiento de CO₂ licuado.

2.5 Consumo final de energía

En general, se observa que el consumo final de energía varía entre los escenarios más que proporcionalmente a la variación de las tasas de crecimiento de la economía. Hay que resaltar que los escenarios modelados consideran diferentes niveles de crecimiento económico y, por lo tanto, de demandas de servicios energéticos. Sin embargo, esas variaciones en la demanda responden por una parte pequeña de las diferencias que se observan en el Gráfico 2.5. En ese gráfico, se puede ver que, excepto por Ecuador, los escenarios de mayor ambición climática son los que derivan en menores consumos energéticos (al comparar en el tiempo los consumos en cada escenario y recordando que el escenario “Políticas anunciadas” es un escenario de alta ambición para Colombia). Esta disminución en los consumos se puede atribuir a mayores niveles de eficiencia energética, incluida la eficiencia alcanzada por la electrificación de los sectores finales. En todo caso, se observa que, independientemente del escenario explorado, el consumo final de energía en 2050 es mayor que el consumo actual.

Gráfico 2.5. Consumo final de energía en los cuatro países de la Región Andina analizados [Petajulios]



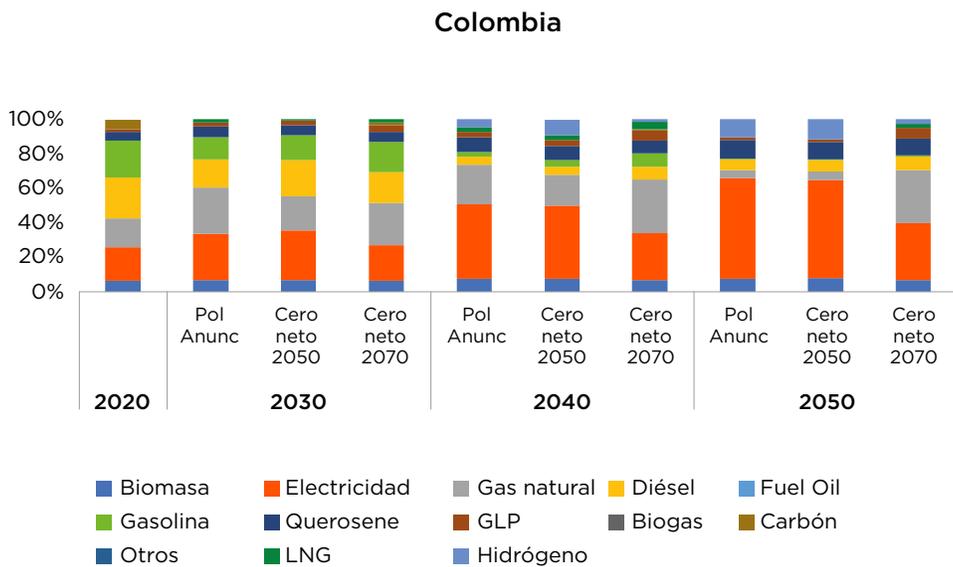
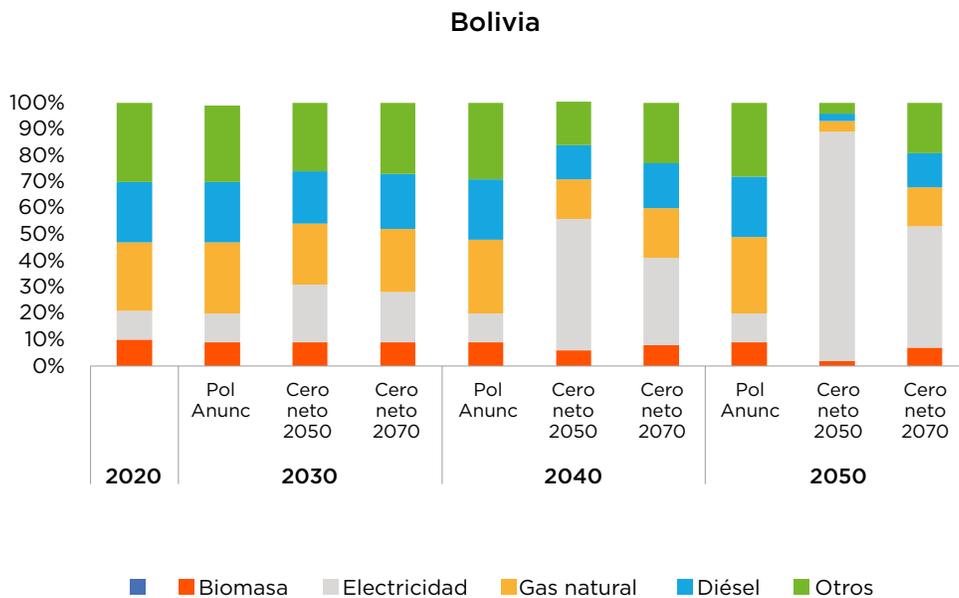
Fuente: elaboración propia.

Nota: Petajulios es una unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía.

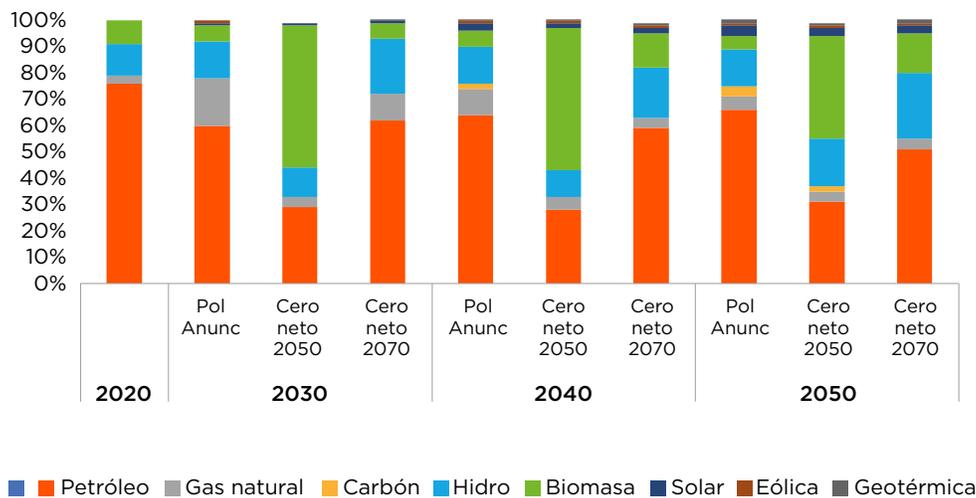
En el Gráfico 2.6, se presenta la composición de la matriz energética de los sectores finales de Bolivia, Colombia, Ecuador (matriz energética total) y Perú, respectivamente. Bolivia y Colombia tienen un incremento importante en el consumo de electricidad en los escenarios de bajas emisiones. En estos países, la electrificación es el motor que mueve a los sectores de consumo final hacia el desarrollo bajo en carbono, particularmente —y como se mostrará más adelante— en el transporte. En Perú, la participación de la electricidad en la canasta de energía final tiene grandes cambios, al igual que Bolivia y Colombia, en el tiempo y entre los escenarios. La disminución en el uso de combustibles fósiles en el sector transporte tiene, en consecuencia, una disminución importante de emisiones de GEI. Finalmente, Ecuador apalanca su disminución de emisiones en el uso de la biomasa con fines energéticos tanto para la producción de biocombustibles líquidos como para la producción de electricidad en sistemas con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés). Esta alternativa lleva a que los escenarios de bajo carbono se logren, en gran medida, con las absorciones netas logradas por la combinación de biomasa con sistemas de CCS requiriendo menores esfuerzos de reducción de emisiones en los sectores finales. Ese uso de biomasa también explica el por qué, en el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2050”, el consumo de energía aumenta en Ecuador (a diferencia de lo que se observa en los demás países). Ese aumento se debe a la baja eficiencia energética de la biomasa (en particular, la usada para la generación de electricidad) que lleva a mayores consumos netos de energía. El modelo de Ecuador ha permitido constatar la gran influencia de la reforestación sobre las decisiones de mitigación del sector energía. En escenarios de menor reforestación, se verificó la mayor exigencia y esfuerzo en el sector energía, incluso mostrando como parte de la solución a la captura y secuestro de CO₂. Otra sensibilidad importante es el precio de carbono que guía las trayectorias calculadas; dependiendo de su valor, la solución del escenario puede variar considerablemente.

Los gases combustibles fósiles disminuyen su participación en 2050 en los escenarios de mayor ambición climática, con respecto al año base, en Bolivia, Colombia y Perú. En todos los países, el pico de gases combustibles se alcanza, en los escenarios de alta ambición climática, antes de 2040. En cuanto a combustibles fósiles líquidos, estos siguen siendo dominantes en 2050 en el escenario “Políticas anunciadas” en Bolivia, Ecuador y Perú. Sin embargo, se observa que la participación de los combustibles fósiles líquidos ya habrá pasado su pico en 2030 en todos los escenarios y países.

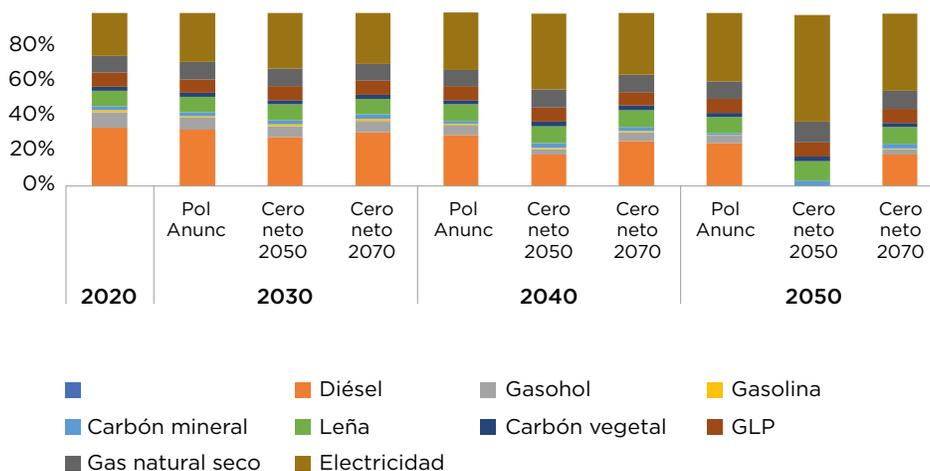
Gráfico 2.6. Participación de los energéticos en la matriz de consumo final



Ecuador



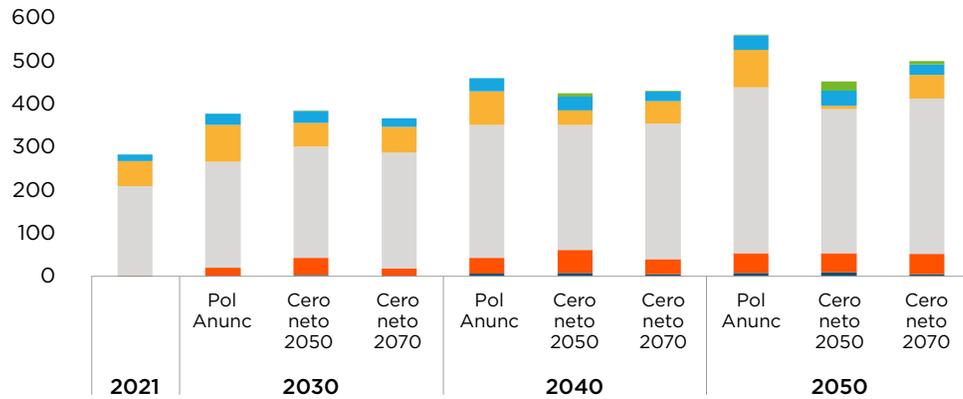
Perú



Fuente: elaboración propia.

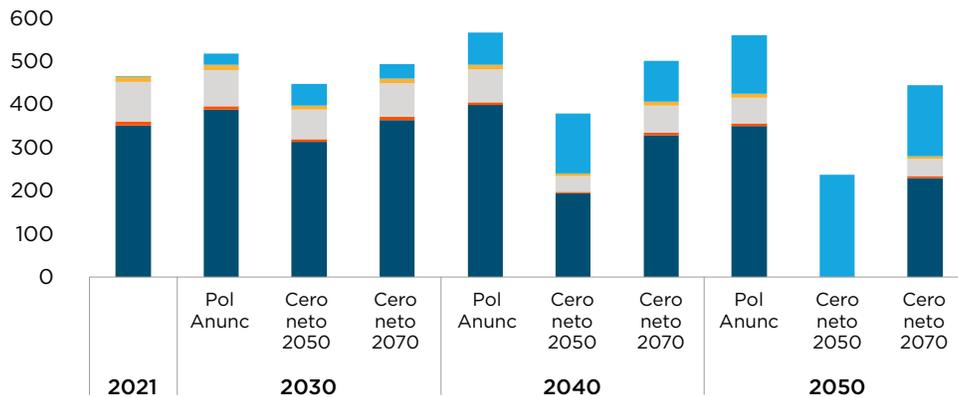
El Gráfico 2.7 presenta la canasta energética del mayor consumidor final de energía en los países analizados, a saber, el transporte. Se puede observar que hay un patrón común: los escenarios de menor ambición climática son los escenarios en los que el consumo de energía en el transporte crecen más respecto al año base y viceversa. Este comportamiento se observa de manera opuesta en el nivel de actividad de la generación eléctrica, como se verá más adelante. Los escenarios de menor ambición climática conservan la estructura de participación de los combustibles fósiles en la canasta del sector. De esta manera, el crecimiento del sector se transfiere casi que directamente (atenuado por alguna ganancia por el uso de equipos más eficientes) a la demanda de combustibles fósiles. Así, en los escenarios de menor ambición climática en Bolivia, Ecuador y Perú se tienen crecimientos en el consumo de energía en el transporte de

Ecuador



■ Electricidad ■ Gas natural ■ Diésel ■ Gasolina ■ Queroseno ■ Hidrógeno

Perú



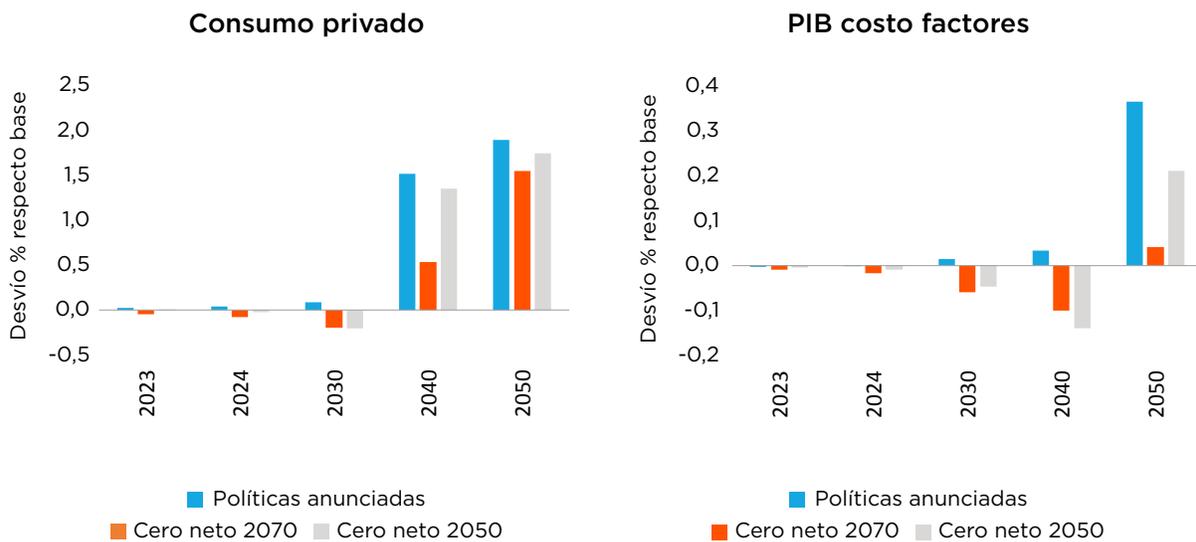
■ Diésel ■ GLP ■ Gasohol ■ Gasolina ■ Electricidad

Fuente: elaboración propia

Recuadro 2.2. Efectos económicos de la descarbonización del transporte en Colombia

En este recuadro se analizan las consecuencias económicas de la descarbonización del sector de transporte para el caso colombiano. Para tal fin, se vinculan los modelos de energía y de EGC del capítulo 1 mediante variables seleccionadas. Más precisamente, se realiza un soft-link entre modelos a través de variables que son endógenas en el modelo de energía y exógenas en el modelo de EGC del capítulo 1. En particular, los modelos se vinculan por variables tecnológicas y montos de inversión. El modelo de EGC captura efectos sobre la economía en su conjunto e incluye consecuencias de formas alternativas de financiamiento de las inversiones públicas y privadas¹². De acuerdo con el Gráfico 2.7 para el caso colombiano, en general, se observa una reducción de la utilización de combustibles fósiles y un incremento de la utilización de electricidad en los distintos escenarios. En otras palabras, vehículos con motores de combustión interna se reemplazan por vehículos con motores eléctricos.

El Gráfico 2 muestra los cambios respecto de la base para el consumo privado y el PIB en períodos seleccionados. El reemplazo de los combustibles fósiles (principalmente, gasolina y diésel) por electricidad como fuente de energía para el transporte genera ganancias de eficiencia que repercuten positivamente sobre la economía. Por ejemplo, en el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2050”, el consumo privado en 2050 se ubica 1,7% por arriba del escenario base, mientras que el PIB es un 0,2% respecto al escenario base.

Gráfico 2. Consumo privado y PIB (desvío % respecto base)

Fuente: elaboración propia.

¹² En este ejercicio, la Matriz de Contabilidad Social de Colombia 2017 se modificó para representar el transporte privado como una actividad productiva. Para ello, se creó una nueva actividad productiva empleando información que originalmente se registra como consumo de los hogares. En particular, el gasto de consumo de los hogares en gasolina, vehículos, seguro automotor y reparación de vehículos se trata como consumo intermedio de una nueva actividad productiva que produce servicios de transporte privado que utilizan los hogares. Luego, es posible simular el reemplazo de vehículos particulares con motor de combustión interna. Además, suponemos que los hogares pueden sustituir entre medios de transporte públicos y privados.

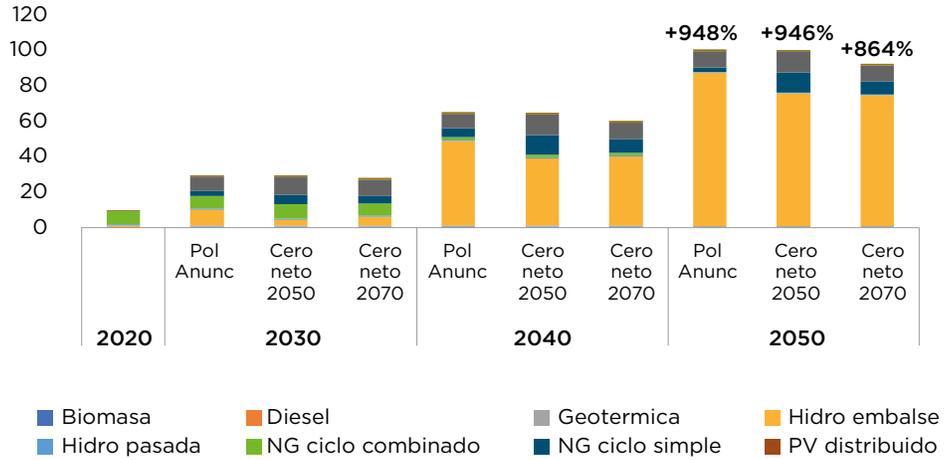
2.6 Generación eléctrica

Finalmente, el Gráfico 2.8 presenta la generación eléctrica por fuente. Como se mencionó en la sección anterior, a mayor ambición climática mayor crecimiento en la generación eléctrica. En Bolivia, la electrificación en todos los escenarios, junto con el aumento en el consumo de energía de sus habitantes, implica un crecimiento de entre 8.6 y 9.5 veces de la generación eléctrica en 2050 comparado con los niveles de 2020. Para Colombia, este crecimiento podría ser de hasta 3.25 veces para alcanzar la carbononeutralidad en 2050. En Ecuador, considerando que las reducciones de emisiones se complementan con una fracción importante de compensaciones en otros sectores, y emisiones negativas derivadas de los sistemas BECCS, el sector eléctrico crece “solo” 161% en 2050 en el escenario de mayor ambición climática. En los tres países que se presentan, ese aumento de la generación se da predominantemente con recursos renovables y nuevas tecnologías (como la nuclear¹³). Las matrices de generación eléctrica, además de los desafíos técnicos asociados a su operación, implican grandes requerimientos de inversión que llevan a bajos costos de operación durante la producción de electricidad.

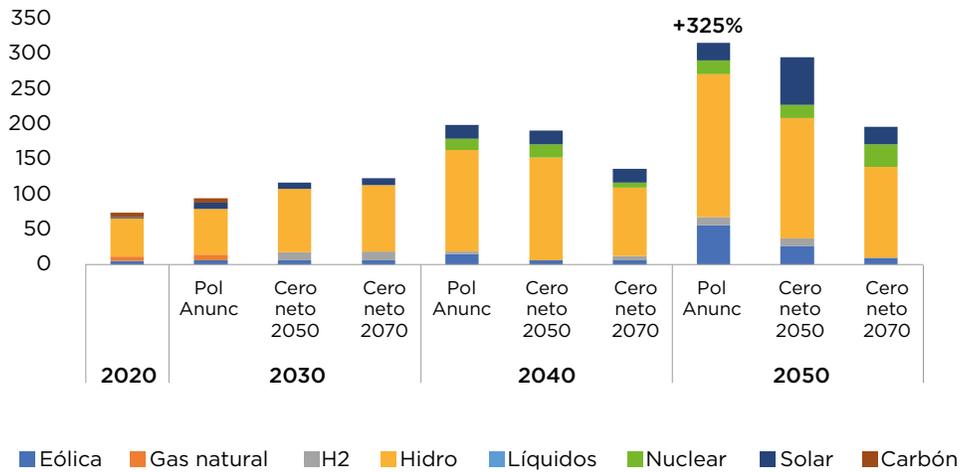
13 Esta opción ha sido también considerada en escenarios de la unidad de planeación minero-energética UPME. Se considera la posibilidad de tener microcentrales nucleares modulares que no requerirían del desarrollo de tantas capacidades locales, como sí lo haría una planta nuclear convencional.

Gráfico 2.8 Composición de la matriz de generación eléctrica

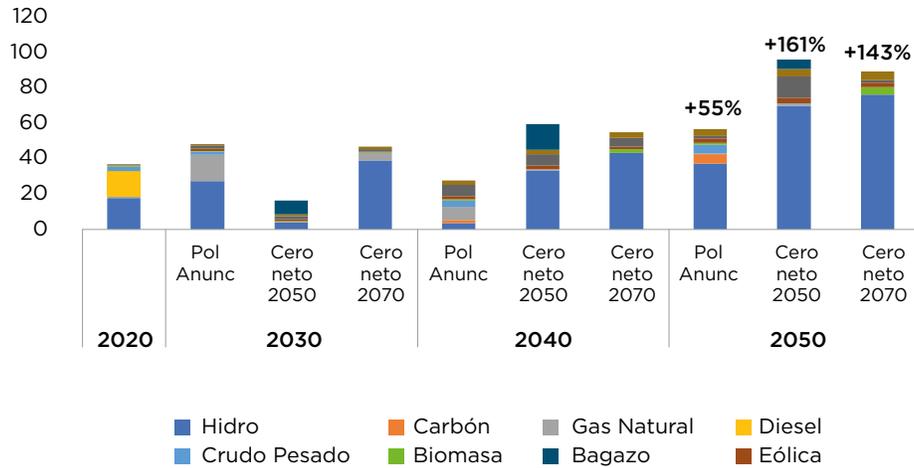
Bolivia



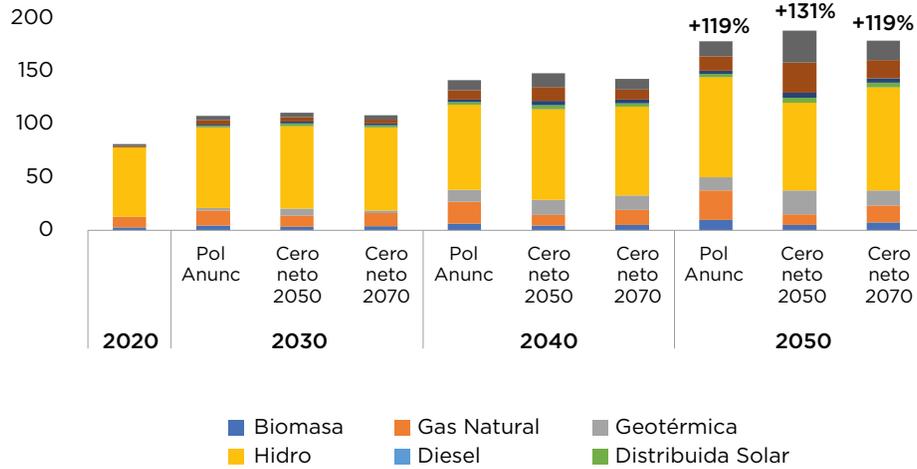
Colombia



Ecuador



Perú



Fuente: elaboración propia.

2.7 Conclusiones

Los sistemas energéticos de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú tienen diferencias, al igual que las características de sus economías y su estado de avance en la ruta hacia la carbononeutralidad. Si bien estas diferencias y aquellas relacionadas con los distintos enfoques de modelamiento empleados en cada uno de los países no pueden perderse de vista, los análisis aquí presentados se construyen a partir de las similitudes en los resultados y hallazgos que permiten identificar requerimientos comunes para enfrentar la transición energética.

El elemento central de este trabajo es la exploración de los escenarios de futuro energético de los diferentes países que se realizó con herramientas de modelaje distintas. En particular, el conjunto de países analizado utilizó modelos de optimización y de simulación. Ambos enfoques de modelamiento tienen fortalezas que los llevan a ser útiles para el uso específico para el que fueron diseñados y los resultados deben interpretarse considerando las características propias de cada enfoque.

Los modelos de optimización (Colombia y Ecuador) “seleccionan” tecnologías, combustibles e inversiones a partir de un criterio de minimización de costos y el cumplimiento de restricciones bajo un marco de competencia perfecta, información completa, racionalidad económica de todos los agentes y previsión perfecta. Por lo tanto, los resultados obtenidos pueden interpretarse como un punto de referencia que en la práctica necesita ser ajustado para mejorar el “realismo” de la solución, por ejemplo, para incorporar las desviaciones que las barreras de implementación, no consideradas en el modelamiento, pueden causar con respecto al escenario de mínimo costo.

Por otro lado, en los países en los que se usó un modelo de simulación o contabilidad (Bolivia y Perú), los resultados reflejan la visión de los modeladores que, a partir de las condiciones iniciales, el contexto, las prioridades del país, la literatura y el criterio de expertos diseñan los cambios posibles que podrían ocurrir en el sector para lograr el desarrollo bajo en carbono. Este enfoque es en principio más “realista”, considerando que las tasas de cambio tecnológico modeladas responden en gran medida a la apreciación de expertos sectoriales con base en la experiencia de difusión de tecnologías en cada país. Sin embargo, el “realismo” de la solución debe ser ajustado en búsqueda de la “mejor” solución (por ejemplo, la que implique menores costos).

El trabajo de modelación es un proceso continuo en el que las herramientas deben mantenerse en permanente actualización y los resultados deben procesarse de manera que, con trabajo adicional y manteniendo las ventajas de cada enfoque, se consigan resultados cada vez más robustos y útiles para informar a los responsables de formular las políticas públicas.

De esta manera, es recomendable que los países que han usado un enfoque de optimización lleven a cabo procesos participativos con líderes y expertos sectoriales para definir las restricciones que emulen las barreras y velocidades de cambio de manera que la solución de mínimo costo obtenida responda a los factores limitantes del mundo real. Por otro lado, se recomienda que los países en los que se usaron enfoques de modelamiento de simulación o contabilidad lleven a cabo la evaluación de múltiples sensibilidades en magnitud de los cambios y tiempos para, a partir de un conjunto amplio de opciones, identificar los casos en los que se logren los mayores beneficios, los menores costos o que puedan ser considerados mejores según un criterio cuantitativo.

El avance hacia un sector energético de muy bajas emisiones implica transformaciones o desarrollos profundos en una o varias ramas de ese sector. No es posible alcanzar disminuciones profundas en los niveles de emisión sin tener desarrollo de nuevas tecnologías o combustibles con masificación acelerada. Estas transformaciones profundas deberían estar alineadas con las estrategias de desarrollo industrial,

técnico y científico de los diferentes países para lograr la mayor cantidad de beneficios sociales y económicos de los procesos de disminución de emisiones en el sector.

Así, por ejemplo, los resultados del caso ecuatoriano muestran que se requiere un desarrollo profundo de la biomasa moderna con fines energéticos acoplada a sistemas de captura y almacenamiento de carbono. Por otro lado, los resultados en Bolivia, Colombia y Perú comparten el despliegue masivo de la generación eléctrica a partir de energías renovables (distinta a la biomasa), la electrificación a gran escala del transporte y el uso de otras tecnologías, como los biocombustibles avanzados o el hidrógeno.

Las tecnologías mencionadas anteriormente comparten, por un lado, que el punto de partida es modesto si se compara con el requerimiento a 2050 y, por otro, que para el fin del horizonte van a ser líneas de negocio de gran peso dentro las economías nacionales. Estas diferentes líneas tecnológicas deben ser desarrolladas e incorporadas dentro del sistema productivo del país. Se recomienda que cada país priorice las transformaciones profundas que le permitirían tener sectores energéticos de bajas emisiones para construir políticas de desarrollo industrial alrededor de ellas.

Las transformaciones profundas que se identificaron en cada país, además de ser muy grandes en magnitud, deben darse con una velocidad muy alta. La velocidad de los cambios es un aspecto crítico porque además de estar restringido por motivos de disponibilidad tecnológica, financiera y otros como de la inercia de los patrones culturales, la renovación del stock de equipos limita seriamente la posibilidad de sustituirlos sin incurrir en pérdidas por abandono de equipos antes del final de su vida útil.

Es fundamental que cada país, una vez haya identificado sus opciones para el desarrollo bajo en carbono del sector, proceda a dar lineamientos claros del nivel de compromiso de largo plazo con los objetivos de carbononeutralidad a través del desarrollo de los instrumentos que le permita lograr los cambios (que ya se mencionaron son profundos) de la alineación de las estrategias productivas, industriales, técnicas y científicas y de anuncios concretos, continuos y coherentes de política para dar señales a los ciudadanos y empresas. Estas señales deben permitir que, haciendo uso de la mejor información posible, todas las inversiones se den de tal manera que se reduzca el riesgo de incurrir en activos varados o en bloqueos de carbono. Esas señales, por supuesto, deben ser emitidas con la suficiente antelación para poder ser incorporadas en el proceso de planeación de inversiones que no con poca frecuencia se dan en ciclos de varios años.

En este sentido, es indispensable que los países revisen el marco de política con el que piensan transitar el camino a la carbononeutralidad. Salvo Colombia, que tiene políticas anunciadas, el resto de los países necesita profundizar el marco de políticas que le permitan esperar emisiones netas cercanas a cero en 2050. En Bolivia se duplican, en Ecuador crecen 40% y en Perú caen apenas una tercera parte. Sin cambios importantes no es posible que los países andinos hagan las contribuciones requeridas para cumplir con el Acuerdo de París.

Cabe preguntarse por qué el marco de política actual es tan diferente del que permitiría la descarbonización de sus economías. La respuesta a esta pregunta está en el escenario “Energía para cero emisiones netas en 2050” y en los requerimientos que impondría a los países para hacerlo realidad. A continuación, se presentan los cuatro requerimientos principales.

El primero de ellos tiene que ver con que la mayor contribución a la reducción de emisiones debe venir del sector transporte, dado que es el mayor consumidor de energía y dado que la demanda se satisface en su casi totalidad con combustibles fósiles (en Colombia, es responsable de la mitad de la reducción requerida para la carbononeutralidad, mientras que en Bolivia, del 90%). En Ecuador y Perú —que tienen un enfoque de modelamiento que integra los sectores diferentes al energético— es el sector de UTCUTS el que debe abrirle espacio al transporte para no hacer una reducción tan pronunciada.

Sea por la vía de la movilidad de bajas emisiones o por la de las absorciones de emisiones, supone retos importantes en términos del cambio de vehículos en países donde hay una proporción importante de pequeños propietarios con baja capacidad de inversión, y de integrar la dimensión de GEI a la planeación y desarrollo del sector agrícola, forestal y de uso del suelo, donde predomina la debilidad institucional y se concentra una mayor parte de la población vulnerable.

El segundo tiene que ver con la capacidad para electrificar la economía. En general, los países deben aumentar considerablemente la producción y el consumo de electricidad de bajas emisiones para alcanzar la carbononeutralidad en 2050. Salvo Ecuador, en los demás países la economía deberá atender entre el 57% y el 87% de su demanda de energía con electricidad frente a entre 11% y 25% en la actualidad.

Hacer esto realidad supone, por el lado de la oferta, asegurar que se construyan y pongan en funcionamiento oportunamente los proyectos de generación y su infraestructura de soporte (sistemas de transmisión y distribución) en la magnitud y velocidad requeridas. Por el lado de la demanda, supone asegurar cambios de equipos de consumo para asegurar tanto las ganancias en eficiencia requeridas como que los distintos sectores de la economía puedan electrificarse. Esto, a su vez, exigiría asegurar un entorno adecuado para el desarrollo de los proyectos y programas de apoyo a gran escala para los segmentos más vulnerables de los sectores económicos, que deben cambiar sus equipos pero no tienen la capacidad de inversión necesaria.

En tercer lugar, se requiere de una agresiva política de adopción de nuevas tecnologías. Las matrices energéticas de la carbononeutralidad son un portafolio que incluye tecnologías que todavía no se han desarrollado comercialmente y que deben ser adoptadas con la oportunidad y escala que necesita la transición. Además de solar y eólica, los países van a requerir de las baterías tanto para almacenamiento como para la movilidad eléctrica, del hidrógeno, del almacenamiento y captura de carbono (las dos últimas con la correspondiente infraestructura de transporte y almacenamiento). Fortalecer y dotar de recursos las políticas de ciencia, tecnología e innovación para que puedan cumplir este papel es un reto para los países andinos.

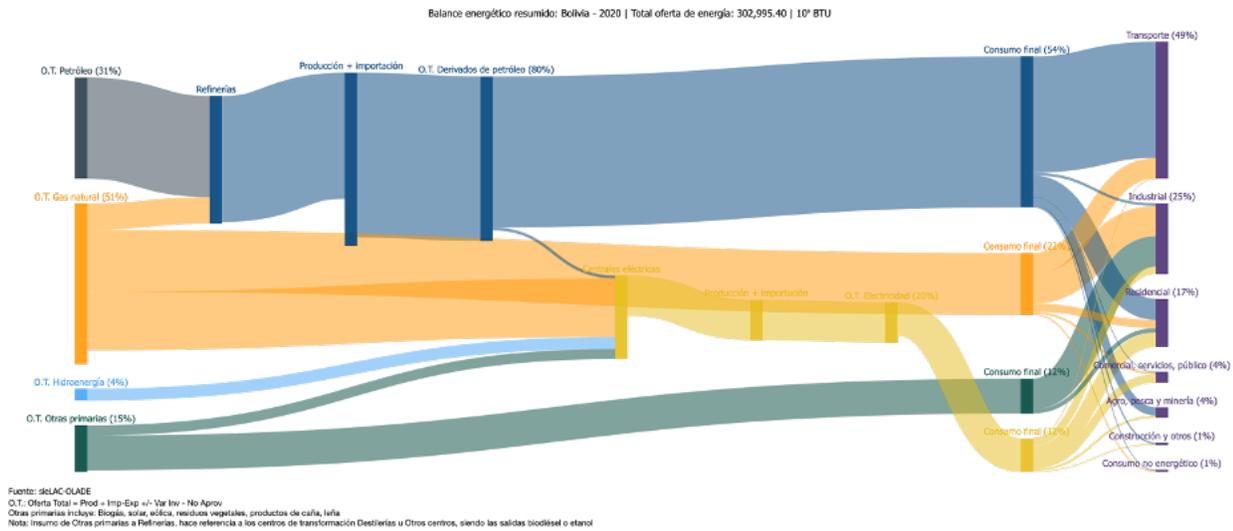
Finalmente, los países deben actuar en dos frentes que son transversales a todas las áreas de la transición energética. Por un lado, la transición requiere de marcos regulatorios que den las señales adecuadas de inversión en un sector como el energético, que es altamente regulado. Y por el otro, la transición es imposible si no se cuenta con los marcos financieros que garanticen la disponibilidad de recursos para las inversiones que deben hacerse tanto en la oferta como en la demanda. En la Región Andina, hay brechas significativas en ambos frentes. Un ejemplo que ilustra esta situación es la ausencia —salvo en el caso de Colombia, donde no tiene el nivel requerido— de mecanismos como impuestos al carbono o esquemas de permisos de emisiones que encarezcan los energéticos con mayor contenido de carbono e induzcan una sustitución de energéticos. Si se tiene en cuenta la realidad de las consideraciones de viabilidad política y social, se entiende que estas hacen muy difícil que se den los cambios en las magnitudes requeridas.

La transición energética en los países andinos es una proposición tan necesaria como retardadora. Además de obligar a sus gobiernos a enfrentar difíciles disyuntivas económicas, sociales y ambientales, les impone retos considerables en materia institucional y regulatoria, así como de disponibilidad de recursos de financiamiento. Los países deben proceder con una saludable dosis de pragmatismo impulsando conversaciones nacionales que promuevan la pedagogía, fomenten la coordinación y permitan afinar las políticas en cuanto a su efectividad e impactos distributivos. Hacia adelante, hay que reconocer la integralidad de la transición y la importancia de entenderla a fondo. Explorar las consecuencias de cambios en la canasta energética sobre estructura productiva, los efectos macroeconómicos de la transición y los niveles de costos en que se incurriría son áreas críticas para enfrentar mejor los retos de política pública que le va a imponer a la región.

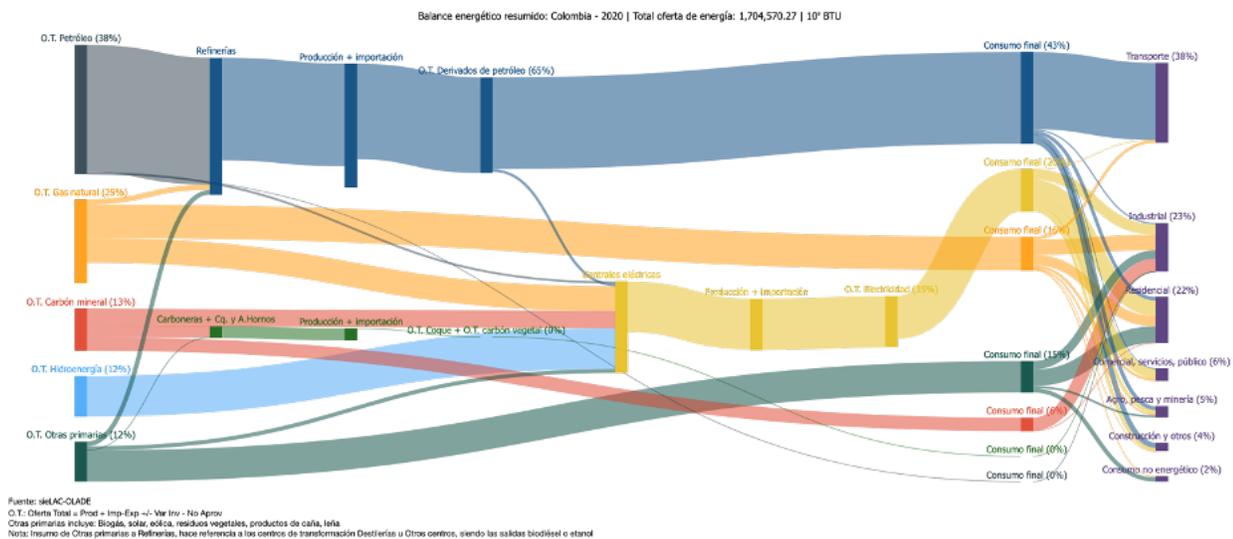
2.8 Anexos

2.8.1 Balances energéticos por país

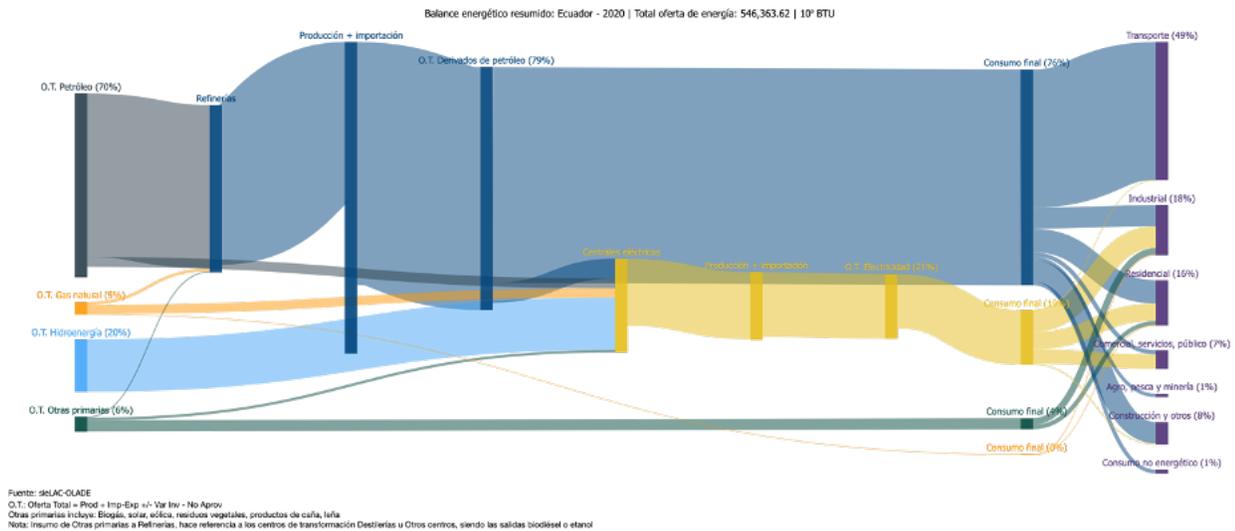
Balance energético resumido: Bolivia - 2020 | Total oferta de energía: 302,995.40 | 10° BTU



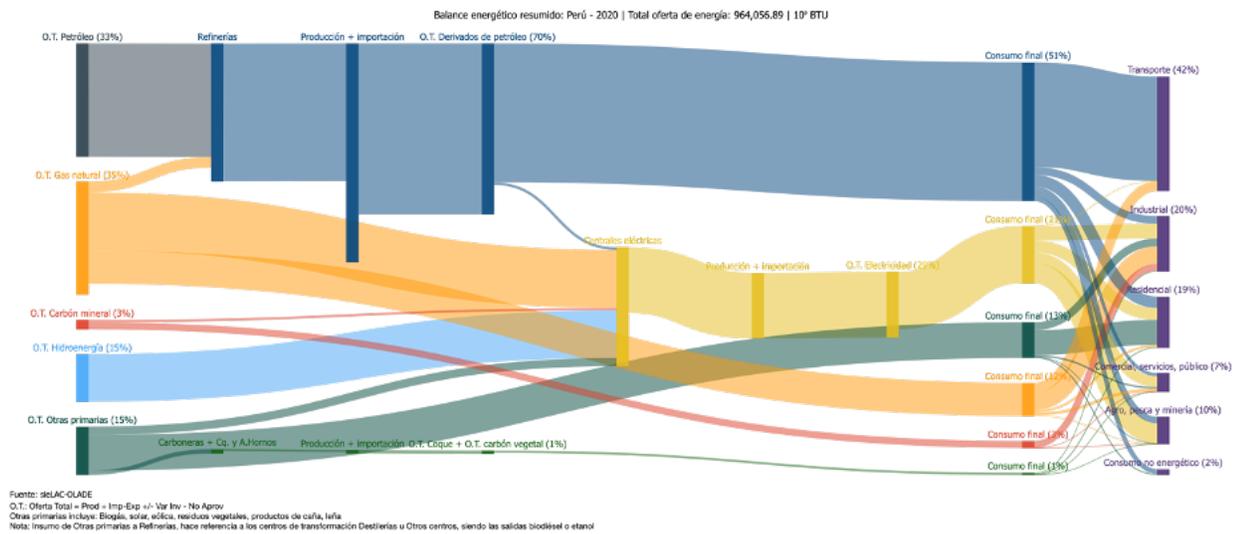
Balance energético resumido: Colombia - 2020 | Total oferta de energía: 1,704,570.27 | 10° BTU



Balance energético resumido: Ecuador - 2020 | Total oferta de energía: 546,353.62 | 10° BTU

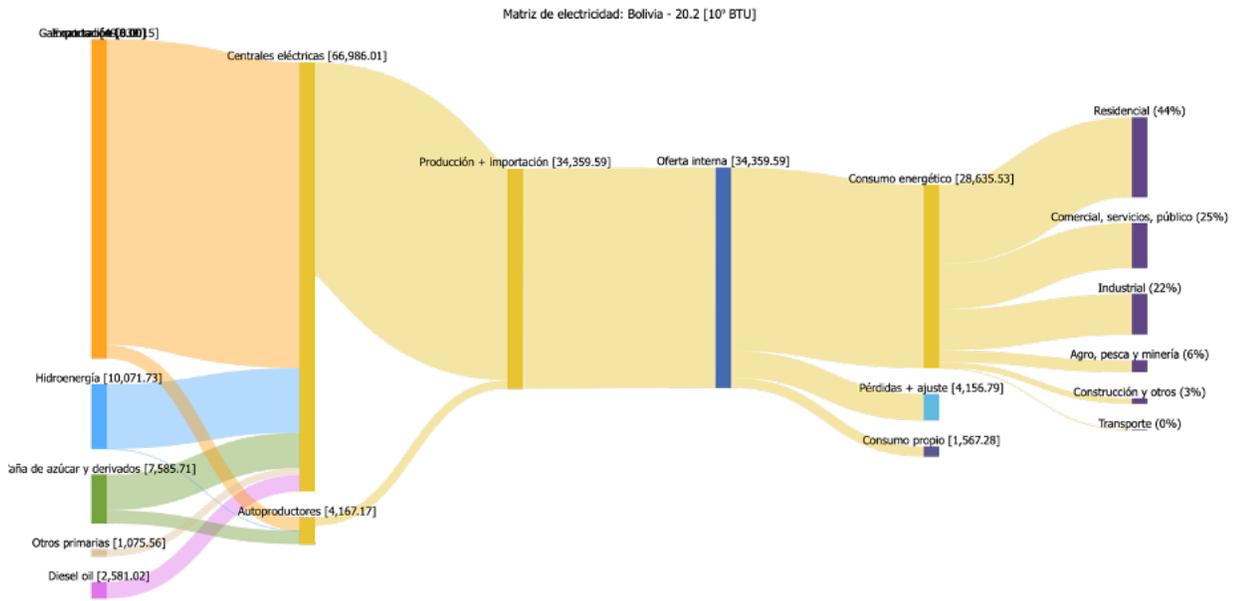


Balance energético resumido: Perú - 2020 | Total oferta de energía: 964,056.89 | 10° BTU



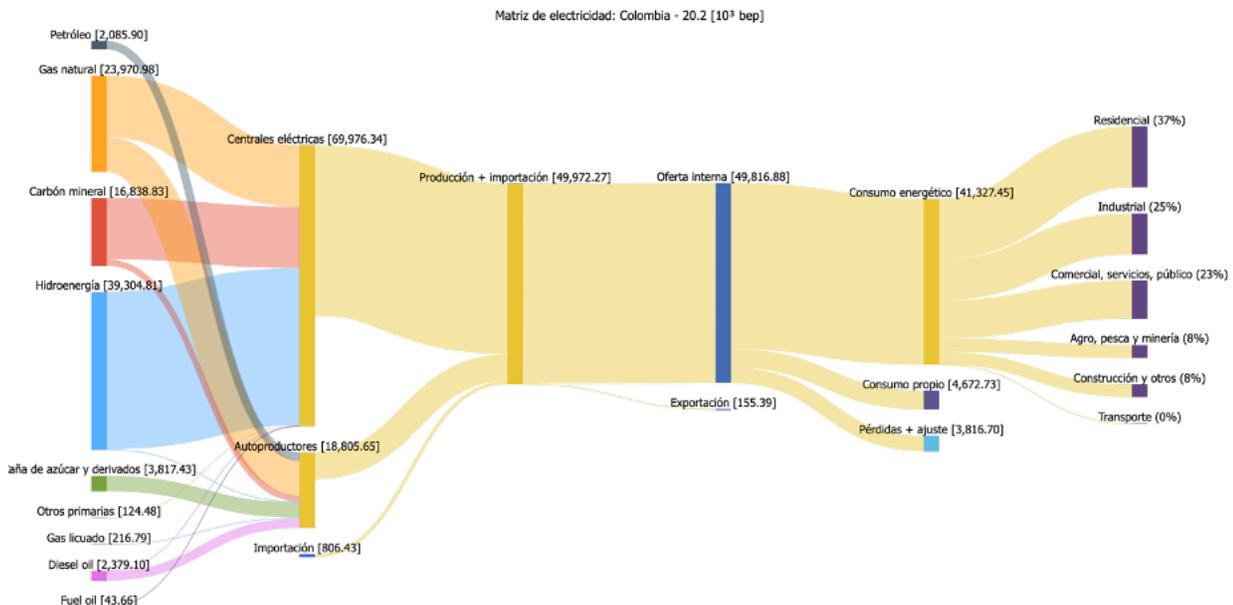
2.8.2 Matrices de generación

Matriz de electricidad: Bolivia - 20.2 [10⁹ BTU]



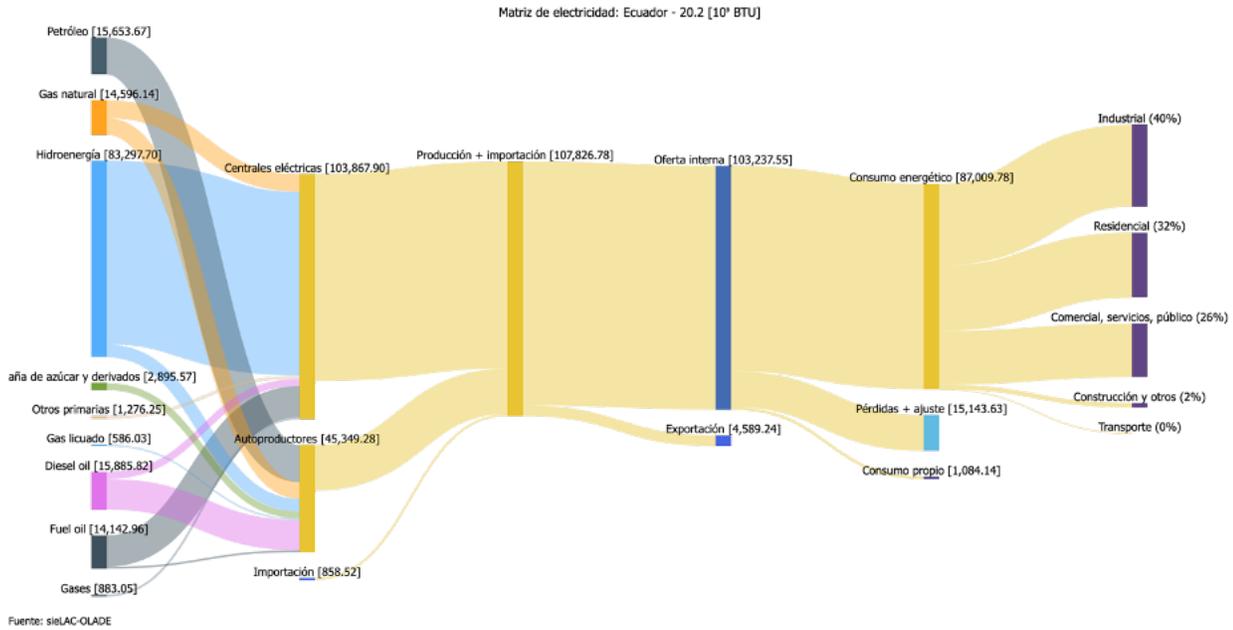
Fuente: sIELAC-OLADE

Matriz de electricidad: Colombia - 20.2 [10³ bep]

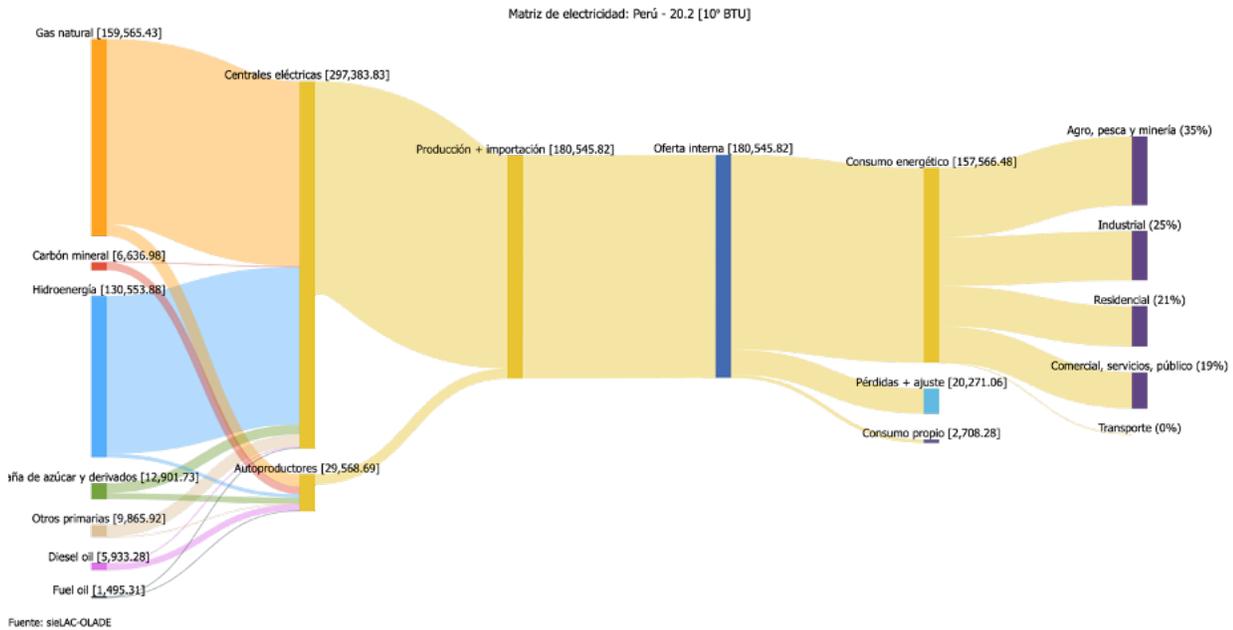


Fuente: sIELAC-OLADE

Matriz de electricidad: Ecuador - 20.2 [10⁹ BTU]



Matriz de electricidad: Perú - 20.2 [10⁹ BTU]



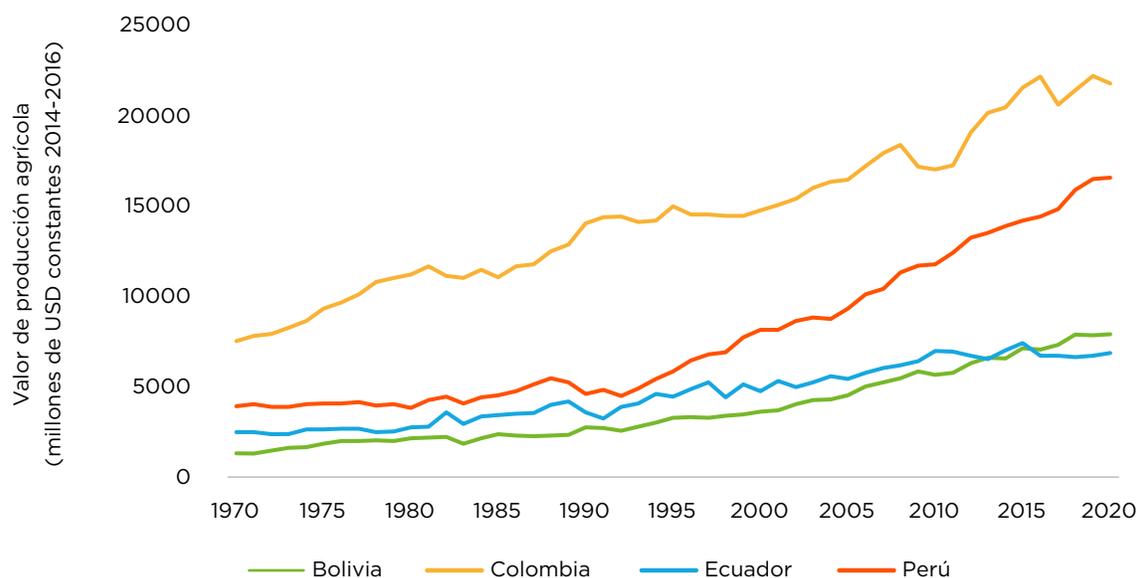
CAPÍTULO 3.

ESTRÉS HÍDRICO Y DE TIERRA EN PAÍSES ANDINOS¹

3.1 Introducción

La región de América Latina y Caribe (ALC) es productora de alimentos, parte de esta producción se exporta alrededor del mundo; además, se evidencia un crecimiento en la producción agrícola y una expansión en las tierras cultivadas durante las últimas décadas² (ver el Gráfico 3.1). Esta expansión de la producción agrícola tendrá como efecto el aumento en el uso de agua y tierra, y llevará a la región a posibles circunstancias donde sobrepasen los límites asumidos de expansión de tierras de cultivo y de extracción de agua (ver Cuadro 3.1), lo cual representa un desafío para el desarrollo sostenible de ALC, en especial de los países andinos (Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú).

Gráfico 3.1. Producción agrícola en los países andinos



Fuente: FAO (2023).

¹ Basado en *Water and Land Stress in Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru under Coupled Climate-Socioeconomic Scenarios* de Feng y Chen (2023).

² Para más detalle revisar: Ceddia (2019), Zalles et al. (2021), Potapov et al. (2022), Song et al. (2021).

Para predecir el estrés que se generaría en el agua y la tierra en la región es importante tener en cuenta los cambios en el clima y las condiciones socioeconómicas bajo las cuales se desarrollarían. Los cambios en las condiciones climáticas, como la temperatura y la precipitación, afectarán directamente la productividad agrícola (Ortiz-Bobea *et al.*, 2021; Nguyen y Scrimgeour, 2022). Por esto, es necesario incorporar el cambio climático en las proyecciones de la demanda de tierra y agua. Además de los cambios en factores climáticos que afectan directamente la producción de alimentos, hay otros cambios de índole socioeconómico que afectan de manera indirecta el ritmo al que se debe producir con el fin de satisfacer la demanda de los productos agrícolas. El crecimiento de la producción agrícola estará impulsado por la creciente demanda de alimentos y otros productos a través de las cadenas de suministro industriales, esto último porque son tanto bienes finales para los consumidores como insumos intermedios en los procesos de producción para las industrias (Bruckner *et al.*, 2019). Agregado a lo anterior, la proyección del crecimiento en la demanda dependerá de tres factores socioeconómicos principales: población, ingresos y urbanización.

El crecimiento de la población resultará en un aumento de la demanda en todos los sectores. Al aumentar el nivel de ingresos, habrá efectos de escala que se refieren al aumento del consumo que se da ante un incremento en los ingresos (efecto ingreso) y efectos estructurales que se refieren a cambios en los patrones de consumo en respuesta al mismo aumento en los ingresos (efecto sustitución) (Fouquet, 2014). La urbanización en un país también puede afectar el consumo y estilo de vida de las personas, esto puede generar impactos ambientales significativos que ocurren cuando los habitantes migran de áreas rurales a urbanas (Yu *et al.*, 2016).

El comercio internacional genera presiones sobre el uso de la tierra y el agua. Gran parte de estos recursos ya están siendo utilizados en los países andinos con el fin de satisfacer la demanda de países extranjeros. Esta demanda tiene tendencias crecientes; de hecho, el comercio internacional está relacionado con una quinta parte de la huella hídrica en el mundo (Hoekstra y Mekonnen, 2012) y con el 37% del uso de las tierras (Wiedmann y Lenzen, 2018). La competencia por los recursos hídricos entre los sectores agrícola y no agrícola (principalmente la industrialización y urbanización) también es un factor cada vez más frecuente, llevando a un aumento en la retirada y consumo de agua (de Oliveira *et al.*, 2009).

Es importante tener en cuenta el límite máximo de expansión de tierras de cultivo, ya que al alcanzar este límite, se estaría utilizando el 100% de las tierras cultivables disponibles. Para abordar este problema, la agricultura irrigada puede ser una solución viable, especialmente en áreas con abundantes recursos hídricos (Zhong *et al.*, 2021). Esto puede ayudar a aumentar el rendimiento de los cultivos por unidad de tierra disponible (Zhang *et al.*, 2016).

Se estima cómo los diferentes factores afectarán la disponibilidad hídrica versus la demanda del recurso (estrés hídrico), así como el uso del suelo (tierra) en los países andinos mediante la elaboración de diversos escenarios socioeconómicos a largo plazo. La herramienta utilizada en el estudio de Feng y Chen (2023) es un análisis insumo-producto global multirregional extendido ambientalmente (GMRIO, por sus siglas en inglés). Este tipo de modelo muestra las relaciones de oferta-demanda directas e indirectas (a nivel país-sector). De esta manera, puede tomar en cuenta simultáneamente las variaciones en la intensidad de uso de la tierra y el agua, necesarias para producir una cantidad específica de cultivo, que son causadas por el cambio climático y los cambios en la demanda global como resultado del desarrollo socioeconómico.

Los escenarios que se tienen en cuenta se realizan acoplando ciertas características climáticas y socioeconómicas. Esto se logra combinando los escenarios mostrados por las trayectorias de concentración representativa (RCP, en inglés) y los escenarios expuestos por las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, en inglés). Los escenarios que han sido acoplados que fueron tenidos en cuenta para este análisis incluyen factores climáticos, de ingresos, poblacionales y de urbanización, y serán mostrados más adelante.

3.2 Método y datos

En el contexto de este capítulo, se aborda una perspectiva ampliada del análisis global multirregional insumo-producto (conocido como GMRIO por sus siglas en inglés) que considera específicamente el aspecto medioambiental de las economías. A través de esta metodología, se procede a realizar una proyección estimada de los requerimientos de tierra y agua en los países andinos desde el año 2017 hasta el año 2050, bajo diferentes escenarios climáticos y socioeconómicos.

Para el escenario base, se ha empleado el más reciente GTAP MRIO (Modelo de Equilibrio General Aplicado de Matrices de Insumo-Producto Mundiales), que se deriva de la base de datos GTAP v11 del año 2017 (Aguiar *et al.*, 2022), el cual contempla 141 regiones y 65 sectores, incluyendo ocho sectores agrícolas³. Para recopilar información sobre el uso de agua⁴ y tierra en la agricultura, se usa el modelo GTAP-W del año 2011 (Haqiqi *et al.*, 2016), y para ajustar estos datos a nuestro modelo, se escala la extracción de agua agrícola y la superficie cultivada con la base de datos AQUASTAT de la FAO, aplicando la suposición de una estructura constante en los ocho sectores agrícolas (ver el Cuadro 3.1). Por ejemplo, se observa que Bolivia y Perú estarían en una situación delicada dado que la tierra cultivada está cerca o supera del límite de expansión para tierras de cultivo.

Para el cálculo del uso de agua en sectores no agrícolas, se utilizó la información sobre la extracción industrial y municipal de agua en el año 2017 de la base de datos de la FAO llamada AQUASTAT para establecer un límite superior⁵ en la cantidad total (Hoekstra y Mekonnen, 2012). También se tomó como referencia la intensidad de uso de agua⁶ del MRIO EXIOBASE para Brasil, México y la región Resto de América como punto de referencia para asignar extracciones de agua industriales y municipales⁷ entre los sectores industriales del GTAP⁸.

Cuadro 3.1. Indicadores de uso de agua y tierra en 2017

| | | Bolivia | Colombia | Ecuador | Perú |
|--------|--|---------|----------|---------|-------|
| Tierra | Tierra de cultivo en 2017 (miles de ha) | 4.488 | 9.892 | 2.464 | 5.718 |
| | Límite de expansión de tierras de cultivo ⁹ | 4.963 | 28.655 | 7.675 | 4.013 |
| | Índice de estrés de tierras de cultivo ¹⁰ | 90% | 35% | 32% | 142% |
| Agua | Extracción de agua en 2017 (km ³) | 2 | 28 | 10 | 35 |
| | Límite de extracción agua | 144 | 590 | 111 | 470 |
| | Índice de estrés de extracción de agua | 1% | 5% | 9% | 7% |

Fuente: elaboración propia.

- 3 Arroz, trigo, otros cereales, vegetales y frutas, semillas oleaginosas, caña y remolacha, cultivos de fibra y otros cultivos.
- 4 Agua extraída que es usada en agricultura.
- 5 Según las Naciones Unidas (2021), se considera que un territorio está experimentando estrés hídrico cuando la extracción de sus recursos renovables de agua alcanza el 25% o más. Los límites de extracción de agua se calculan como el 25% del total de la cantidad renovable.
- 6 Agua/tierra necesaria para producir 1 dólar en alimentos.
- 7 Incluye la extracción de agua doméstica, que se utiliza principalmente para beber, cocinar y limpiar. El agua municipal en general también se utiliza para la industria urbana, el embellecimiento urbano (incluyendo jardines) o la agricultura urbana de riego. Ver: <https://www.fao.org/3/bc821e/bc821e.pdf>
- 8 Para más detalle, ver Feng y Chen (2023).
- 9 Se obtiene a partir de la baja estimación de las tierras de cultivo potencialmente disponibles en Eitelberg *et al.* (2015).
- 10 Se define como la relación entre la cantidad utilizada y el límite de cada país.

Se combinan diferentes escenarios que consideran el crecimiento económico y su posible impacto en el calentamiento global. Para ello, se utilizaron los escenarios RCP presentados en el estudio de Riahi *et al.* (2017), junto con los escenarios SSP del IPCC (2015). Estos escenarios acoplados incluyen factores como el clima, los ingresos, el crecimiento poblacional y la urbanización.

Los SSP son narrativas que describen cómo podrían evolucionar las tendencias sociales, tecnológicas y de crecimiento económico a nivel mundial. Por otro lado, las RCP consideran los efectos climáticos y simulan las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en diferentes niveles de forzamiento radiativo (medido en W/m^2 , watts por metro cuadrado) previstos para el año 2100. Para este estudio, se han seleccionado los siguientes escenarios: SSP1-RCP2.6, SSP2-RCP4.5 y SSP5-RCP8.5, los cuales se describen a continuación en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.2. Descripción de los escenarios SSP y RCP acoplados

| Escenario | Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) | Trayectorias Representativas de Concentración (RCP) |
|-----------------|---|---|
| SSP1 RCP2.6 | <p>Sostenibilidad: tomando el camino verde (bajo desafíos para la mitigación y adaptación)</p> <p>El mundo está avanzando poco a poco hacia un camino más sostenible, en el que se da importancia a un desarrollo inclusivo que respete los límites ambientales. La gestión de los bienes comunes globales está mejorando lentamente, y se está invirtiendo más en educación y salud, lo que acelera la transición demográfica. La desigualdad está disminuyendo tanto dentro como entre países. El consumo está orientado hacia un crecimiento bajo en materiales y una menor intensidad de recursos y energía.</p> | <p>Se prevé que las emisiones de GEI alcancen su punto máximo en la década de 2020 y luego disminuyan rápidamente. Este escenario se considera el más ambicioso en términos de reducción de emisiones y se espera que limite el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C por encima de los niveles preindustriales.</p> |
| SSP2 RCP 4.5 | <p>Camino intermedio (desafíos moderados para la mitigación y la adaptación)</p> <p>El mundo sigue un patrón histórico en cuanto a tendencias sociales, económicas y tecnológicas, con un desarrollo y crecimiento de ingresos desigual entre países, y las instituciones globales y nacionales trabajan hacia objetivos de desarrollo sostenible. El crecimiento poblacional global es moderado y la desigualdad de ingresos persiste o mejora lentamente.</p> | <p>Describe una situación en la que las emisiones de GEI seguirán aumentando hasta la mitad del siglo XXI y luego comenzarán a disminuir gradualmente. Se espera que en un mundo con RCP 4.5, se logre limitar el aumento de la temperatura global a alrededor de 2,4 °C por encima de los niveles preindustriales.</p> |

| Escenario | Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) | Trayectorias Representativas de Concentración (RCP) |
|-------------------------|---|---|
| SSP5 RCP 8.5 | <p>Desarrollo impulsado por combustibles fósiles: tomando la autopista (altos desafíos para la mitigación, bajos desafíos para la adaptación)</p> <p>Hay una creciente confianza en los mercados competitivos, la innovación y las sociedades participativas como motores del progreso tecnológico y del desarrollo del capital humano, en que podría considerarse los caminos hacia la sostenibilidad. Los mercados globales están cada vez más interconectados y se están realizando inversiones significativas en salud, educación e instituciones para mejorar el capital humano y social. No obstante, esto se podría combinar con la explotación de recursos de combustibles fósiles y la adopción de estilos de vida intensivos en recursos y energía en todo el mundo, lo que resulta en un rápido crecimiento de la economía global, mientras que el crecimiento de la población mundial llega a su punto máximo y comienza a disminuir en el siglo XXI. Aunque se están abordando con éxito los problemas ambientales locales, como la contaminación del aire, se cree en la capacidad de gestionar de manera efectiva los sistemas sociales y ecológicos, incluyendo la geoingeniería, si es necesario.</p> | <p>Se prevé que las emisiones de GEI seguirán aumentando sin control durante todo el siglo XXI. Se espera que esta trayectoria cause un aumento de aproximadamente 4,5° C en la temperatura media global por encima de los niveles preindustriales.</p> |

Fuente: Riahi et al. (2017) e IPCC (2015)

3.3 Resultados

En los tres escenarios SSP-RCP, se demuestra que los países llegarían a experimentar un crecimiento en la demanda total de tierra y fuentes hídricas. En Bolivia, la demanda de agua crece sobre todo bajo los escenarios SSP1-RCP2.6 y SSP5-RCP8.5; la demanda de tierra crece más rápido en el escenario SSP1-RCP2.6. En Colombia, el estrés hídrico crece más bajo el escenario SSP5-RCP8.5 y el estrés sobre la tierra lo hace en el escenario SSP1-RCP2.6. En Ecuador y Perú, el estrés hídrico y sobre la tierra es más alto en el escenario SSP1-RCP2.6. Los cuatro países estarán dentro de los límites planetarios en cuanto al uso del agua, dada la gran disponibilidad de recursos hídricos, aunque se ha registrado un aumento significativo en el índice de tensión de agua en cada uno de ellos en comparación con 2017. A pesar de la abundante disponibilidad de recursos hídricos, los cuatro países se mantendrán dentro de los límites planetarios en lo que respecta al uso del agua. Sin embargo, se ha observado un aumento notable en el índice de tensión hídrica en cada uno de ellos en comparación con 2017. En cuanto al uso de tierras, Bolivia y Perú excederán significativamente sus límites planetarios en los tres escenarios SSP-RCP, mientras que Colombia y Ecuador se mantendrán dentro de sus límites establecidos (véase Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Estrés hídrico y de tierra bajo escenarios futuros acoplados SSP-RCP

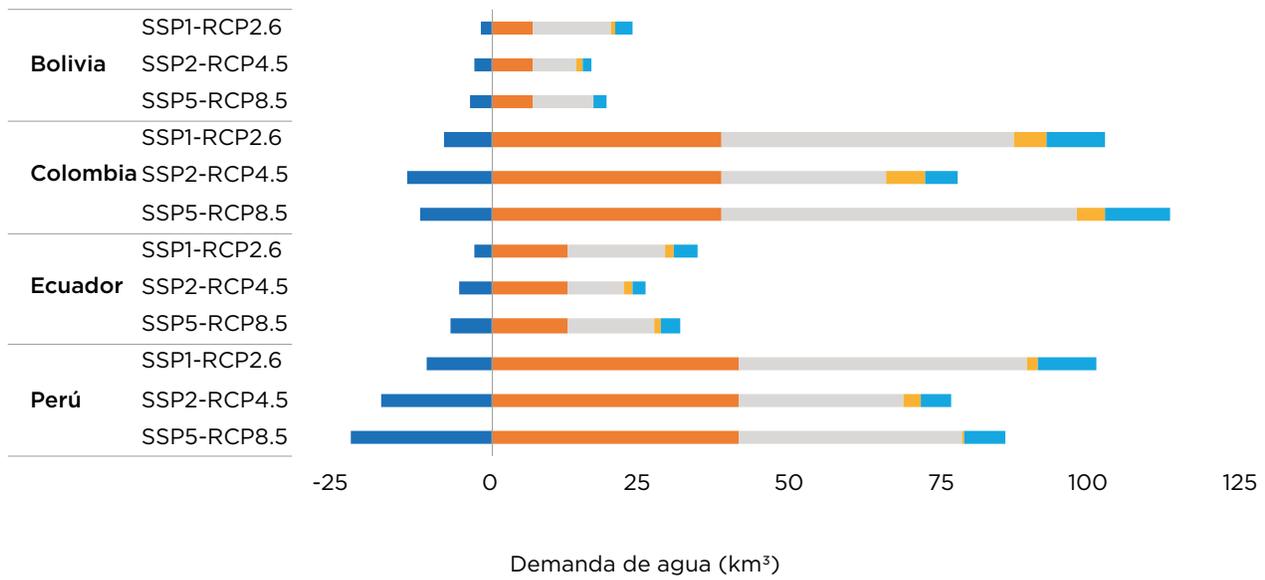
| País | Escenario | AGUA | | TIERRA | |
|----------|-------------|-----------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| | | Cantidad (km ³) | Estrés Índice | Cantidad (1.000 de ha) | Estrés Índice |
| Bolivia | SSP1-RCP2.6 | 7,37 | 5% | 13662 | 275% |
| | SSP2-RCP4.5 | 5,21 | 4% | 7995 | 161% |
| | SSP5-RCP8.5 | 6,87 | 5% | 8032 | 162% |
| Colombia | SSP1-RCP2.6 | 79,90 | 13% | 18729 | 65% |
| | SSP2-RCP4.5 | 51,28 | 9% | 11193 | 39% |
| | SSP5-RCP8.5 | 88,34 | 15% | 11150 | 39% |
| Ecuador | SSP1-RCP2.6 | 25,53 | 23% | 5338 | 70% |
| | SSP2-RCP4.5 | 16,61 | 15% | 3093 | 40% |
| | SSP5-RCP8.5 | 20,85 | 19% | 3128 | 41% |
| Perú | SSP1-RCP2.6 | 77,57 | 17% | 11058 | 276% |
| | SSP2-RCP4.5 | 50,74 | 11% | 6484 | 162% |
| | SSP5-RCP8.5 | 55,32 | 12% | 5748 | 143% |

Fuente: elaboración propia.

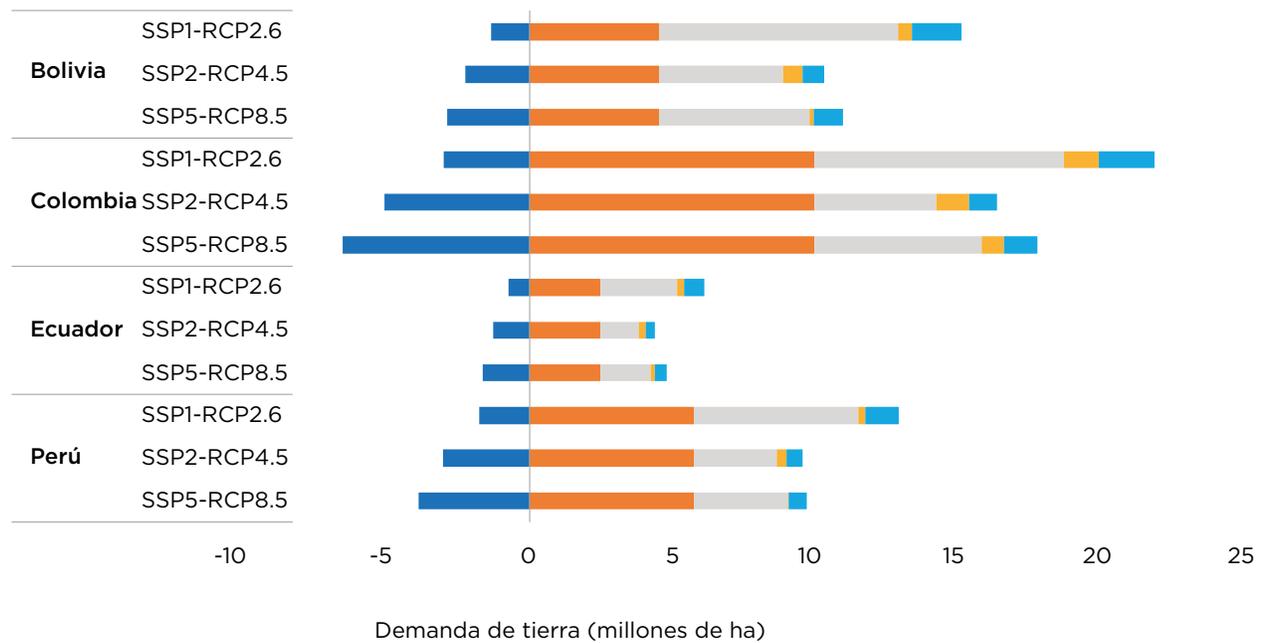
En todos los países andinos evaluados, el incremento del ingreso es el factor más significativo en el cambio de demanda futura de tierra y agua. El aumento de la población y la expansión de la urbanización provocan un incremento relativamente menor en la demanda de tierra y agua. Aunque los cambios en la productividad agrícola disminuirán en cierto grado, la expansión de la demanda de tierra y agua no serán suficientes para compensar la contribución de los otros factores. Los factores de nivel de ingreso, población y urbanización generarán un aumento promedio de la demanda de agua de 21,72, 1,80 y 4,21 km³ y de la demanda de tierra de 4,51, 0,48 y 0,94 millones de hectáreas, respectivamente (ver el Gráfico 3.2). Por otro lado, se encuentra que la productividad agrícola disminuirá la demanda de agua en 6,43 km³ y la de tierra en 2,78 millones de hectáreas¹¹. El Gráfico 3.2 muestra la contribución relativa de los cuatro factores (productividad agrícola, población, ingresos y urbanización, representados con su color respectivo) al nivel de demanda de agua y tierra en 2050 en comparación con 2017.

11 Ver Anexos 3.5.1 y 3.5.2.

Gráfico 3.2. Factores que impulsan el crecimiento de la demanda de agua y de tierra en los escenarios combinados a 2050 (cambios con respecto al escenario base)



■ Productividad agrícola ■ Base ■ Ingreso ■ Población ■ Urbanización



■ Productividad agrícola ■ Base ■ Ingreso ■ Población ■ Urbanización

Fuente: elaboración propia.

En el escenario base, el sector agrícola es el que más utiliza el agua, y la competencia por el agua entre los sectores agrícola y no agrícola es moderada en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú; el agua utilizada para productos agrícolas en 2017 representó el 95%, 80%, 88% y 86% del total de extracciones de agua dulce en estos países, respectivamente. En Bolivia, Ecuador y Perú, el mayor uso agrícola del agua se da en los vegetales, frutas y nueces, mientras que en Colombia, los granos y los cultivos de aceite y azúcar dominan el uso del agua.

A partir de lo observado, se espera que en el escenario SSP1-RCP2.6 el crecimiento de la demanda de agua y tierra en 2050 sea impulsado con mayor fuerza en los cuatro países debido a la producción de productos para la exportación. En este escenario, Ecuador es el país más afectado por la demanda extranjera de recursos hídricos, un 36% de la demanda de agua va para actividades de producción de exportación. En cuanto a la demanda de tierra, Colombia y Ecuador son los países más afectados, cerca del 30% y el 45% de la demanda, respectivamente, se relaciona con la producción de exportación. El crecimiento de los niveles de ingresos en los países socios comerciales de Ecuador y Colombia es el más crítico debido a su proyectado rápido crecimiento.

Si bien los factores extranjeros tienen una influencia significativa en el crecimiento de la demanda de agua y tierra en Ecuador y Colombia, el crecimiento inducido por la demanda local sigue siendo el factor más importante. Los cuatro países se encuentran en desarrollo con un rápido crecimiento de ingresos y urbanización, lo que será el principal impulsor del futuro estrés hídrico y de tierra (ver Anexo 3.5.1).

Se proyecta que la demanda de agua de los sectores no agrícolas crecerá mucho más rápido que la del sector agrícola en todos estos países en los cuatro escenarios. Bajo el escenario SSP5-RCP8.5, se espera que la proporción del uso del agua en los sectores no agrícolas en el total del uso de agua aumente significativamente en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, pasando del 5%, 16%, 12% y 10% en el escenario base al 12%, 28%, 39% y 34%, respectivamente. También se proyecta que el crecimiento del uso del agua en los sectores agrícolas de cada país sea del 204%, 174%, 46% y 17%, respectivamente, mientras que la tasa de crecimiento del uso del agua en los sectores no agrícolas es del 723%, 454%, 590% y 429%, respectivamente. En Ecuador, Colombia y Perú, los sectores no agrícolas tienen contribuciones similares al crecimiento del uso total del agua que los sectores agrícolas; en Bolivia, los sectores agrícolas siguen siendo los principales contribuyentes (ver Anexo 3.5.3).

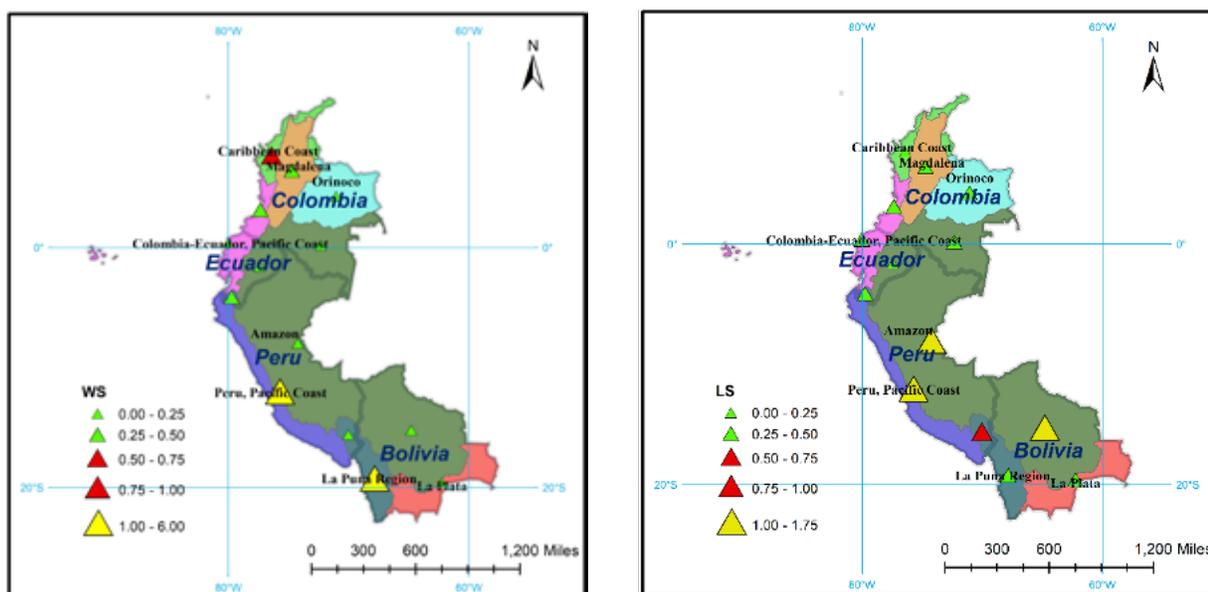
Los sectores manufactureros son los principales competidores de la agricultura por los recursos hídricos. El aumento en el uso del agua en la manufactura se debe a su proceso continuo de urbanización e industrialización. Sin embargo, debido a la estructura económica diferente de los cuatro países, los sectores manufactureros que consumen más agua varían significativamente. En Bolivia, el consumo de agua en la manufactura es impulsado principalmente por los sectores de alimentos y productos industriales. En Colombia, los sectores industriales y los productos químicos son los principales contribuyentes. En Ecuador, los sectores de alimentos, productos industriales y equipos son los que más consumen agua, mientras que, en Perú, el sector minero es el más demandante de agua.

Se proyecta que el uso de agua en el sector minero en Perú aumentará del 3% en el escenario base al 7% en SSP1-RCP2.6, 8% en SSP2-RCP4.5 y 12% en SSP5-RCP8.5 para el año 2050. Dado que Perú es un importante proveedor de minerales a nivel mundial, el rápido desarrollo de la industria minera intensificará aún más la competencia por los recursos hídricos entre los sectores agrícola y minero.

A nivel espacial de cuencas hidrográficas, la presión en cada cuenca aumentará en línea con la tendencia a nivel nacional. Sin embargo, se observa que la cuenca de la costa del Pacífico en Perú y la región de la puna ya han superado los límites asumidos. El uso del agua en la cuenca de la costa del Caribe y la cuenca de la costa del Pacífico colombo-ecuadoriano se encuentra cerca de los límites, lo que significa que el fu-

turo crecimiento de la demanda de agua ejercerá una presión significativa sobre los recursos hídricos de estas regiones. En cuanto al estrés del uso de la tierra, se evidencia que la cuenca del Amazonas y la cuenca de la costa del Pacífico en Perú, así como la cuenca del Amazonas en Bolivia, han superado sus límites. Además, se prevé que la región de la puna en Perú enfrente graves limitaciones de recursos de tierra en el futuro cercano.

Figura 3.1. Estrés hídrico (izquierda) y de tierra (derecha) a nivel de cuenca a través de los países andinos a 2017



Fuente: elaboración propia.

Nota: Los triángulos rojos señalan una presión leve, los triángulos verdes indican que la cuenca se encuentra cerca del límite planetario, y los triángulos amarillos denotan que la cuenca ha rebasado el límite planetario.

Es posible que se presenten desequilibrios geográficos en los recursos hídricos y de tierra de los países. En el caso específico de Perú, existe una distribución desigual del agua, ya que el 97% del agua disponible se encuentra en la cuenca del Amazonas (OCDE, 2021). Es crucial proteger la cuenca del Amazonas del desarrollo agrícola, ya que la expansión agrícola en 2017 había superado el límite del uso del suelo, lo que podría ocasionar daños significativos en el ecosistema de la selva amazónica. Aunque la escasez de agua no es un problema promedio en Perú, el estrés hídrico sigue siendo un desafío a nivel subnacional, especialmente en el oeste del país, donde el agua es escasa. Bolivia presenta una situación similar.

Bolivia y Perú podrían enfrentar una presión severa sobre los recursos de tierra bajo los tres escenarios en 2050. El equilibrio entre los recursos de agua y tierra se puede lograr mediante el uso de la agricultura irrigada. Se simulan los resultados de agua y tierra para Bolivia y Perú cuando la proporción de agricultura irrigada en el área total cultivada aumenta en un 10%, 20% y 30% en comparación con 2017. Los datos de la base AQUASTAT de la FAO indican que en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú, las relaciones de rendimiento entre la agricultura sin sistema de riego y con este son de 2,00, 1,60, 1,77 y 1,99, respectivamente. Esto subraya la posibilidad de lograr un equilibrio entre los recursos de agua y tierra a través de la agricultura de riego. Al simular los efectos en Bolivia y Perú al aumentar en un 10%,

20% y 30% la proporción de agricultura de riego respecto al área total cultivada en 2017, se observa que ambos países podrían enfrentar una intensa presión sobre los recursos de tierra en los tres escenarios para 2050.

El Cuadro 3.4 se muestra que la expansión de la agricultura irrigada puede generar ahorro de manera efectiva en el uso de tierra y equilibrar el estrés. En el escenario SSP1-RCP2.6, si Bolivia expande su agricultura irrigada en un 10%, su índice de estrés de tierra disminuiría en un 22%, mientras que su índice de estrés de agua solo aumentaría en un 3%. Un aumento del 1% en el índice de estrés de agua puede compensar un índice de estrés de tierra mucho mayor. Por ejemplo, en el escenario SSP1-RCP2.6 (alta mitigación de GEI), cuando la agricultura irrigada en Perú se expande en un 30%, el índice de estrés de agua solo aumentaría en un 1%, mientras que el índice de estrés de tierra disminuiría en un 108%. Por el contrario, en el escenario como el SSP5-RCP8.5, donde hay un alto desarrollo tecnológico con poca reducción de emisión de GEI, muestra en Bolivia una reducción de presión sobre la tierra hasta de 84%, pero un aumento en la presión en los recursos hídricos de hasta 121%.

Cuadro 3.4. Índice de estrés en bajo niveles de expansión de agricultura irrigada

| Escenario | Recurso | Expansión de la agricultura irrigada | | | |
|----------------|---------|--------------------------------------|------|------|------|
| | | 0% | 10% | 20% | 30% |
| Bolivia | | | | | |
| SSP1-RCP2.6 | Tierra | 275% | 253% | 234% | 218% |
| | Agua | 5% | 8% | 11% | 13% |
| SSP2-RCP4.5 | Tierra | 161% | 136% | 116% | 100% |
| | Agua | 4% | 10% | 18% | 27% |
| SSP5-RCP8.5 | Tierra | 162% | 125% | 98% | 78% |
| | Agua | 5% | 23% | 64% | 126% |
| Perú | | | | | |
| SSP1-RCP2.6 | Tierra | 276% | 217% | 185% | 161% |
| | Agua | 17% | 17% | 17% | 17% |
| SSP2-RCP4.5 | Tierra | 162% | 105% | 77% | 59% |
| | Agua | 11% | 11% | 11% | 11% |
| SSP5-RCP8.5 | Tierra | 143% | 77% | 49% | 33% |
| | Agua | 12% | 12% | 12% | 12% |

Fuente: elaboración propia.

Es importante tener en cuenta que este estudio considera distintos escenarios de políticas y caminos de desarrollo que se combinan con otros escenarios sociales que evalúan el posible desarrollo socioeconómico de los países andinos.

3.4 Conclusiones

En todos los escenarios considerados, se prevé que la demanda de tierra y agua en los cuatro países aumente rápidamente. En el escenario SSP1-RCP2.6, Bolivia tendrá el crecimiento más rápido, con un aumento del 268% y 204% en la demanda de agua y tierra, respectivamente. Para el año 2050, se espera que la demanda de tierras de cultivo en Perú y Bolivia supere los límites de disponibilidad asumidos en este estudio. Este aumento en la demanda se debe principalmente al incremento en los ingresos, que es el principal factor que contribuye a la creciente necesidad de agua y tierra.

En Ecuador y Colombia, se prevé que la demanda extranjera desempeñe un papel importante en el aumento de la demanda de tierra, mientras que, en Ecuador y Perú, la demanda de agua será impulsada principalmente por los sectores no agrícolas. Esto generará una mayor competencia por el agua entre los sectores agrícola y no agrícola, especialmente en Perú, donde la competencia por los recursos hídricos entre los sectores minero y agrícola seguirá intensificándose.

Además, se ha identificado un desajuste significativo en la distribución espacial de los recursos hídricos y de tierra en Perú y Bolivia. La expansión de las tierras de cultivo en la cuenca del Amazonas en estos países ya ha superado el límite de disponibilidad asumido. Aunque puede requerir un desarrollo extenso de infraestructura hidráulica, Bolivia y Perú tienen el potencial de lograr la sustitución de recursos hídricos abundantes por recursos de tierra escasos a través del uso de la agricultura irrigada. En resumen, se prevé que la demanda de tierra y agua en estos países continúe aumentando en el futuro, lo que requerirá una gestión cuidadosa y sostenible de estos recursos críticos.

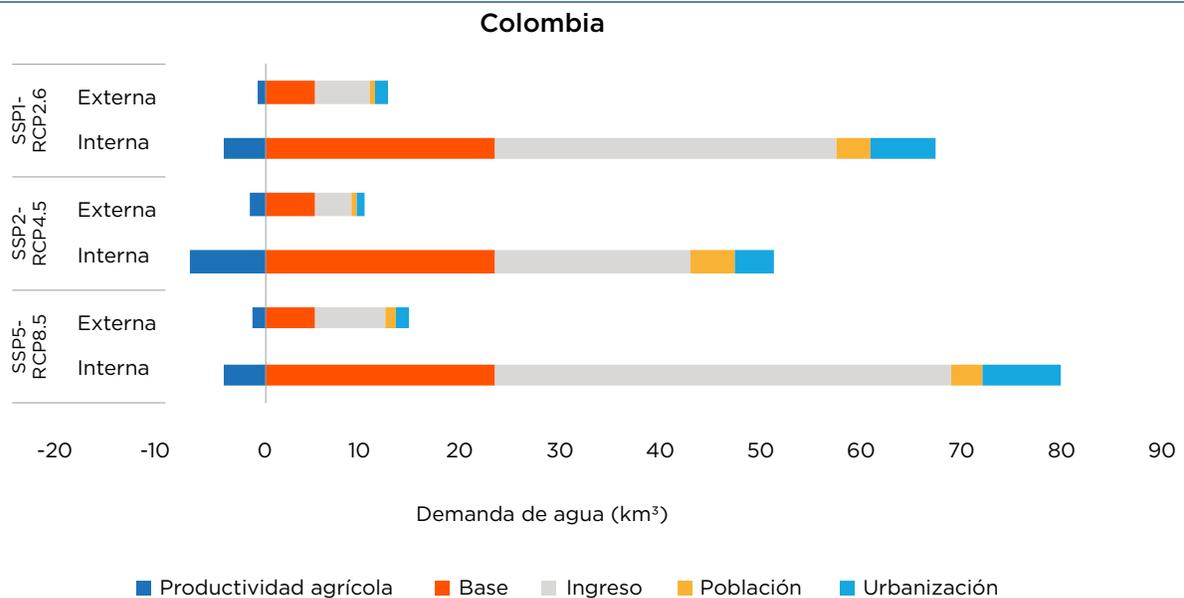
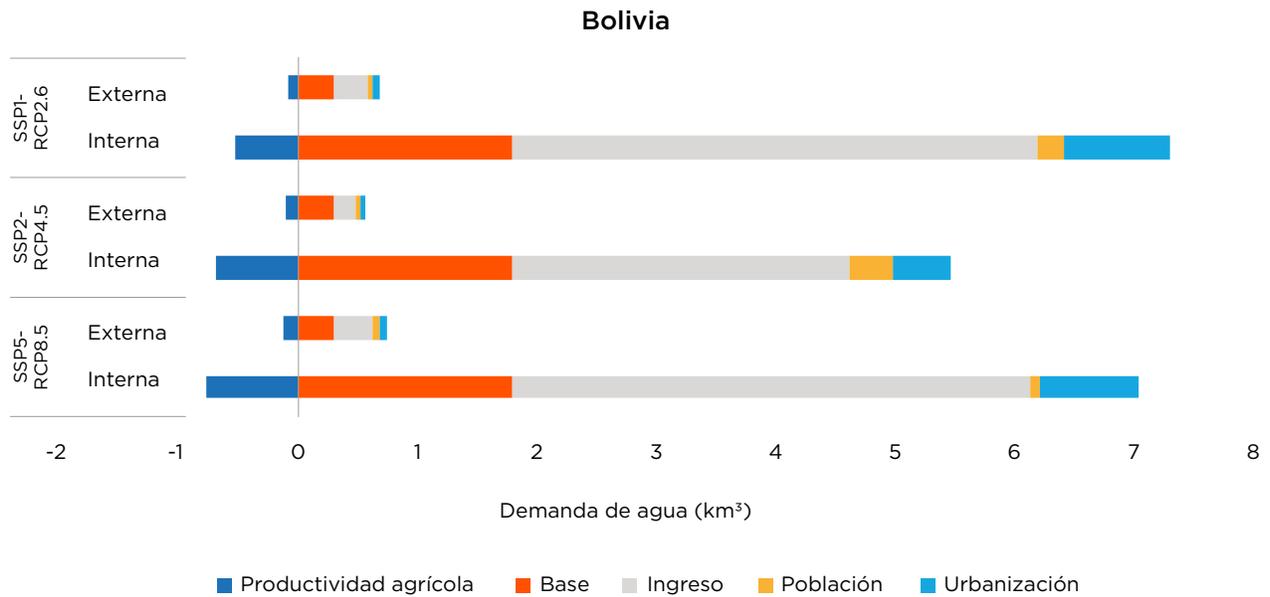
Se ha identificado que, en los países andinos, el sector agrícola posee una ventaja comparativa, lo que significa que su producción agrícola es más eficiente y rentable que en otros sectores. Sin embargo, el aumento de la demanda externa está ejerciendo una mayor presión sobre los recursos locales de agua y tierra, por lo que es importante tomar medidas para reducir esta presión. Una posible solución es la industrialización y el desplazamiento de las industrias con ventajas comparativas de la agricultura a otros sectores, lo que permitiría liberar recursos para satisfacer la demanda externa sin agotar los recursos locales.

Además, se propone el desarrollo de infraestructuras de riego eficientes para sustituir los escasos recursos de tierra por abundantes recursos hídricos. La construcción de tales infraestructuras equilibraría eficazmente la demanda de agua y de tierras destinada a usos agrícolas, considerando el desajuste espacial entre la oferta y la demanda de agua, según los escenarios explorados en este estudio. Como ejemplo se puede mencionar la infraestructura verde, es decir, el diseño y construcción de sistemas naturales o basados en la naturaleza que proporcionan beneficios ambientales, sociales y económicos.

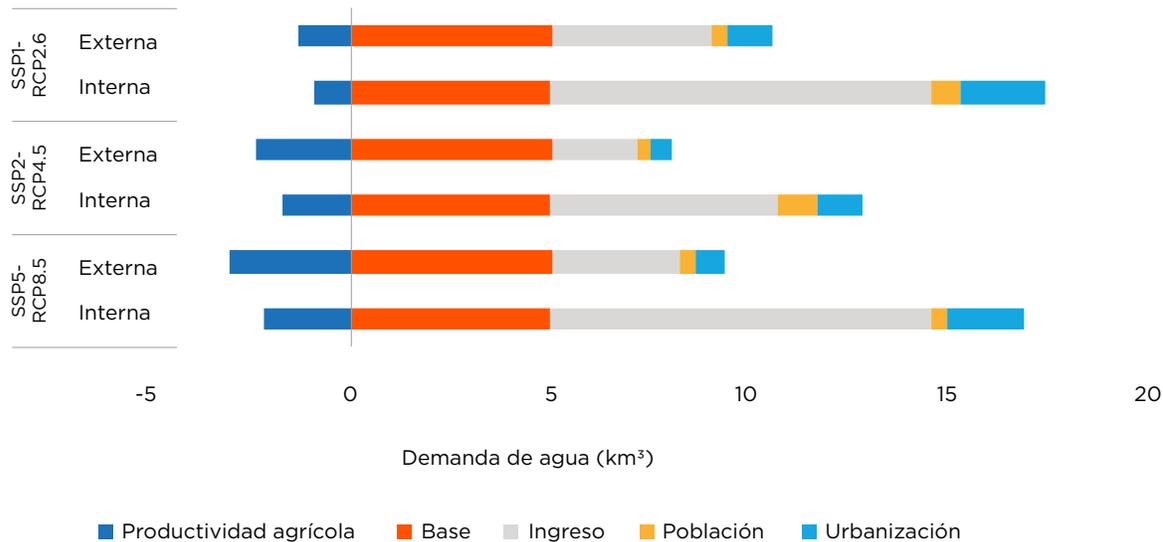
Por otro lado, la alta presión sobre la tierra en los países andinos estudiados subraya la importancia de promulgar políticas que limiten la expansión de las tierras de cultivo, especialmente en la cuenca del Amazonas. Una medida que se podría tomar es establecer límites claros sobre la cantidad de tierra que se puede convertir a uso agrícola o incentivar a los agricultores para que utilicen prácticas de gestión de la tierra más sostenibles. De esta manera, se podría preservar la tierra y asegurar su uso sostenible para las generaciones futuras.

3.5 Anexos

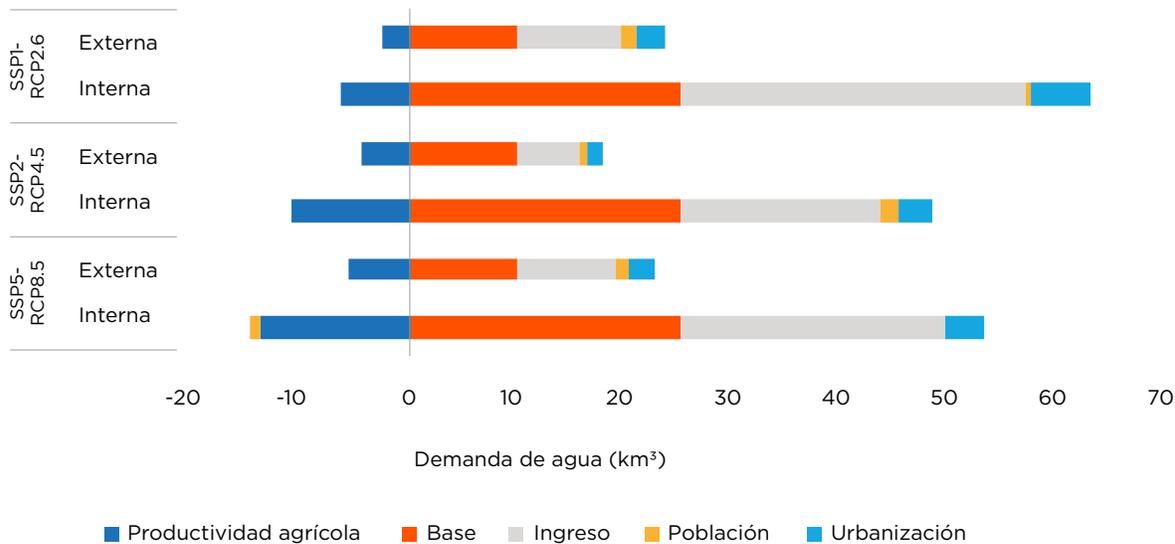
Anexo 3.5.1. Impacto de la demanda interna y externa en la demanda de agua y tierra



Ecuador



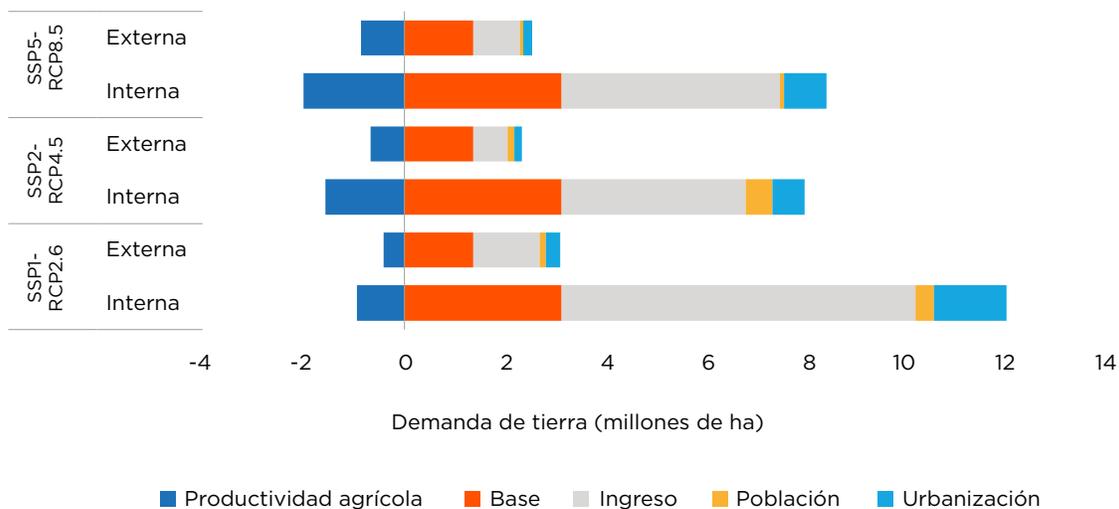
Perú



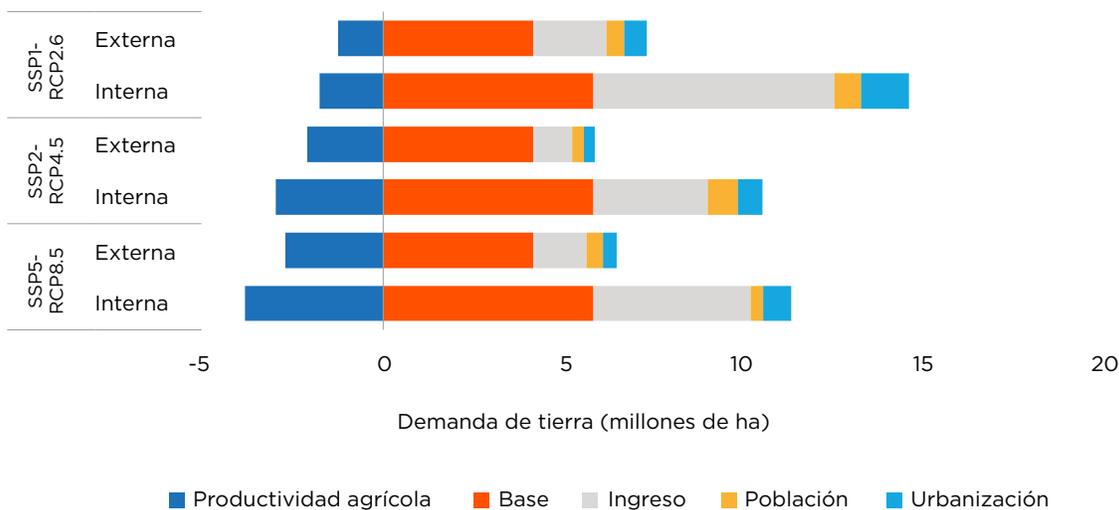
Fuente: adaptado de Feng y Chen (2023).

Anexo 3.5.2. Impacto de la demanda interna y externa en la demanda de tierra

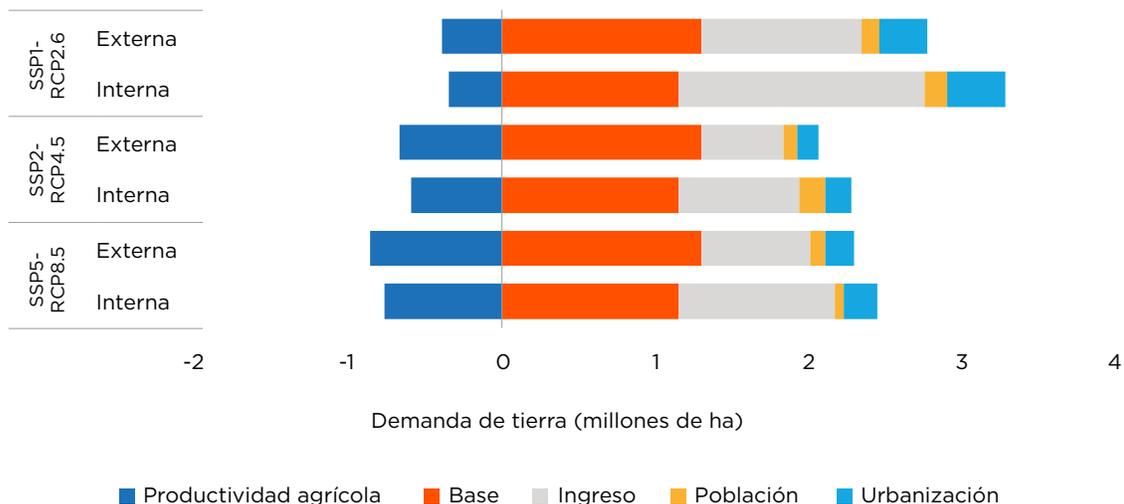
Bolivia



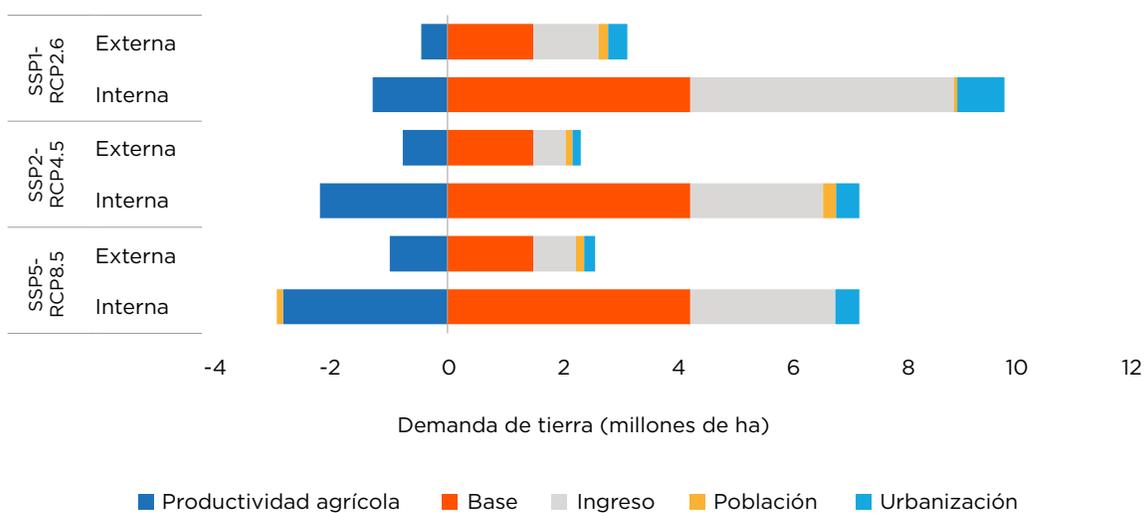
Colombia



Ecuador

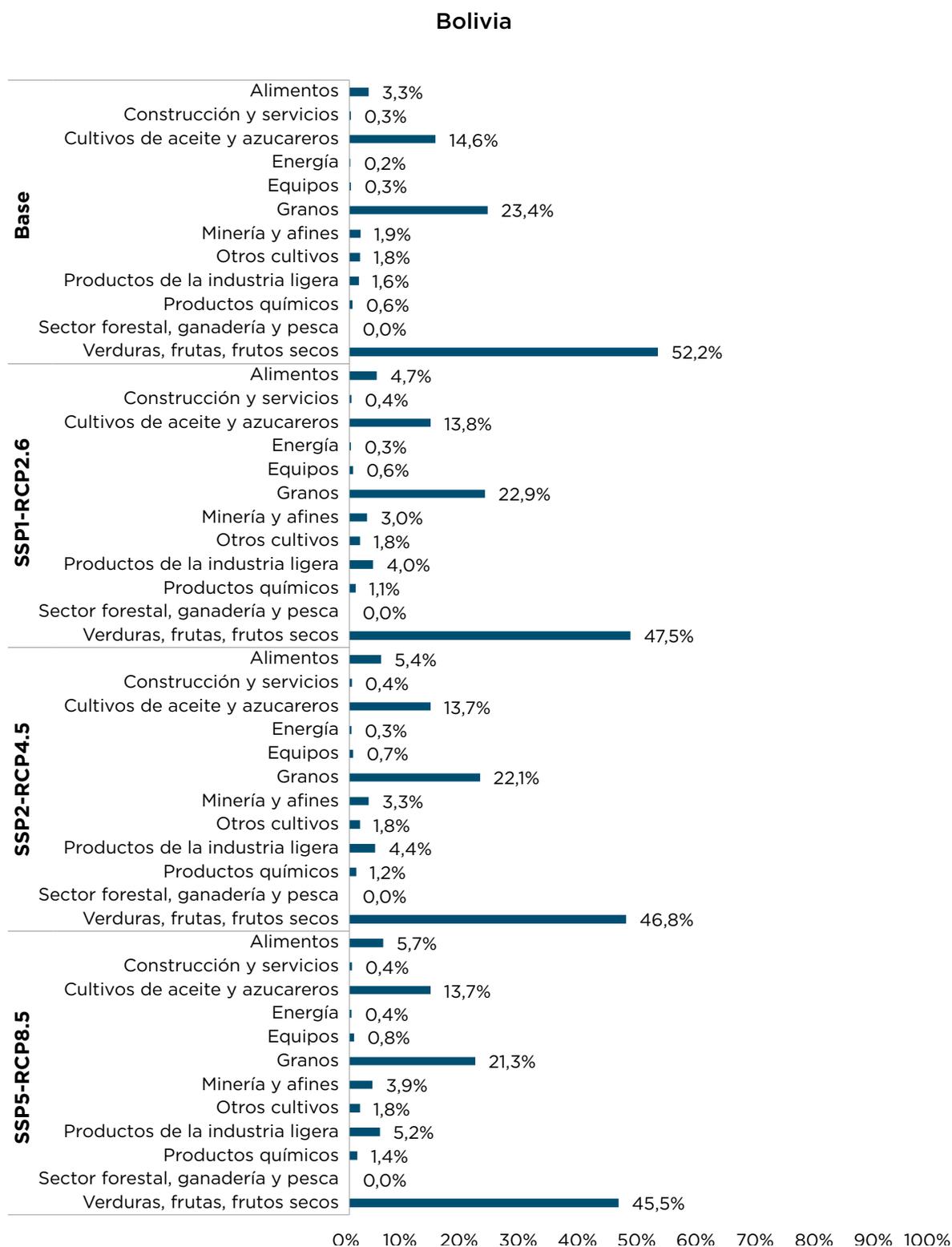


Perú

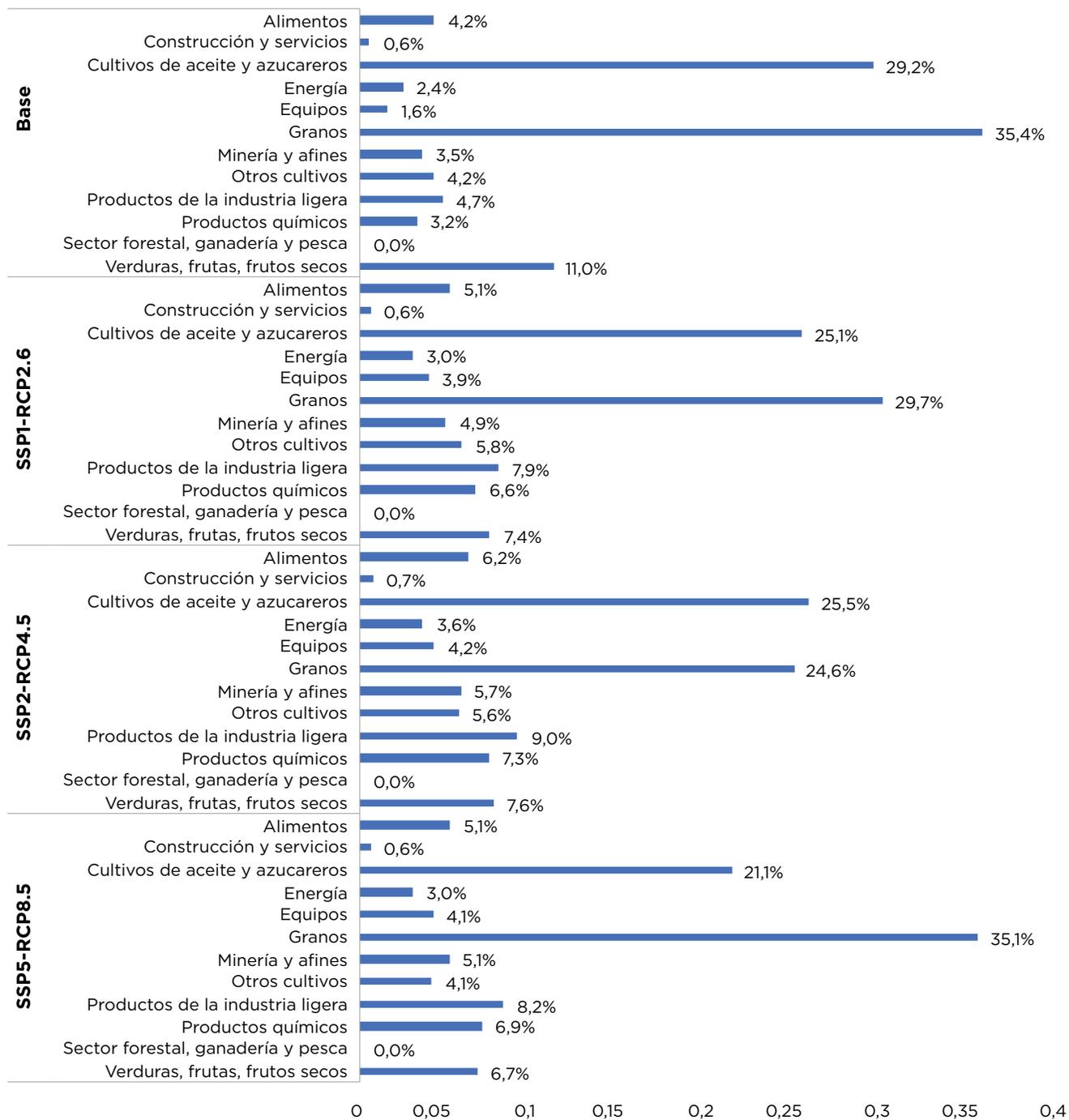


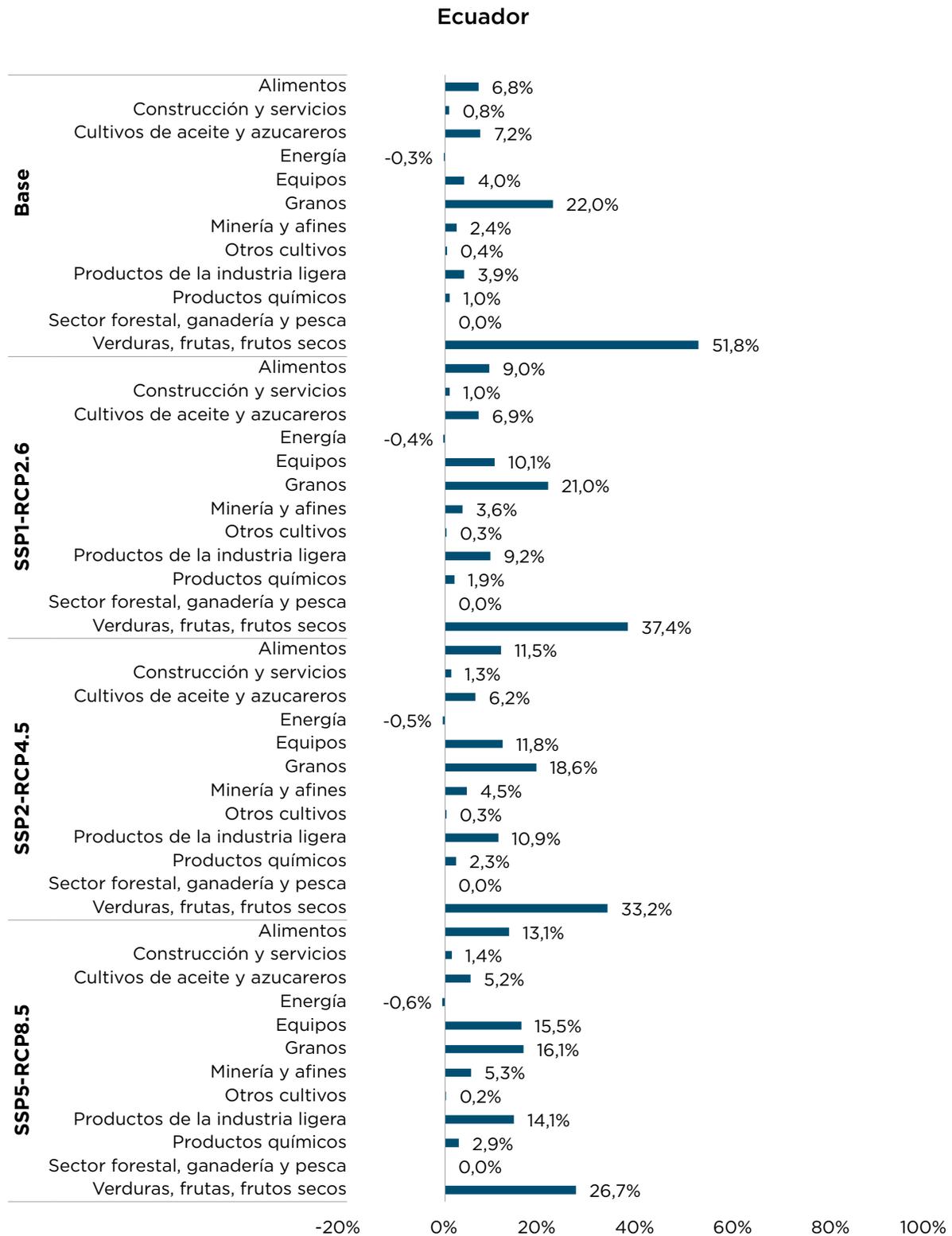
Fuente: adaptado de Feng y Chen (2023).

Anexo 3.5.3. Demanda de agua por sectores en el escenario base y escenarios acoplados

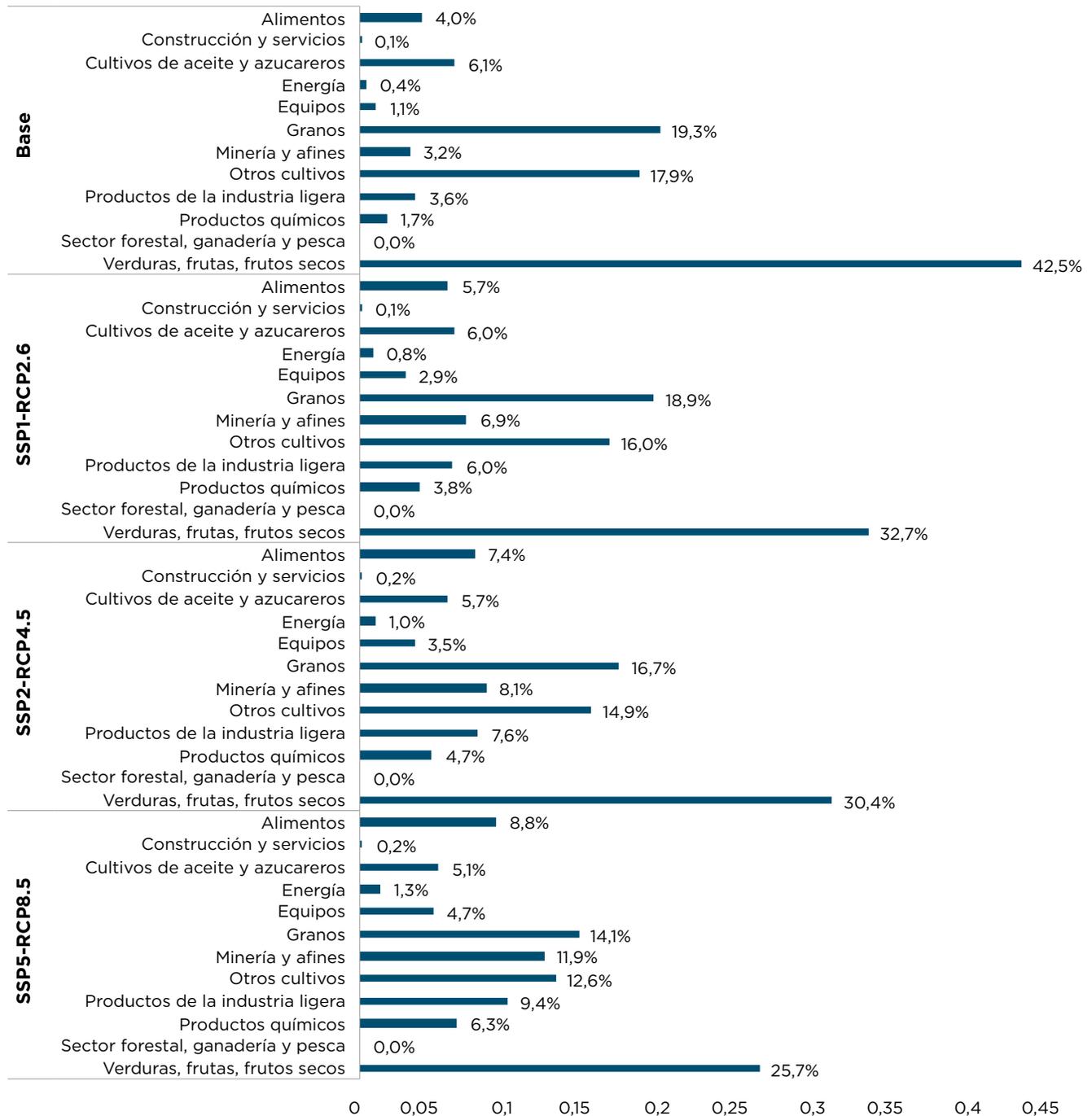


Colombia





Perú



REFERENCIAS

- Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E. y van der Mensbrugghe, D. (2022). The Global Trade Analysis Project (GTAP) Data Base: Version 11. *Journal of Global Economic Analysis*, 7(2), 1-37. <https://doi.org/10.21642/JGEA.070201AF>
- Andrew, B. (2011). Policy instruments for reducing greenhouse gas emissions. The RMIT Accounting for Sustainability Conference, 1-12.
- Andrián, L. y Manzano, O. (Eds.) (2023). *Nuevos horizontes de transformación productiva en la Región Andina. Monografía del BID*; 1022. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Andrián, L., Canavire-Bacarrea, G., Jimenez, J. P., Martinez-Vazquez, J. y Muñoz, A. (de próxima publicación). Dependencia de los gobiernos subnacionales de la región andina de los ingresos fiscales provenientes de los recursos naturales no renovables. Desafíos y reformas a corto y mediano plazo. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Arrow, K. J. (2005). Personal Reflections on Applied General Equilibrium Models. En T. J. Kehoe, T. N. Srinivasan y J. Whalley (Eds.), *Frontiers in Applied General Equilibrium Modeling: In Honor of Herbert Scarf*. Cambridge University Press.
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Horridge, J. M. y Vargas, R. (2016). A conceptual framework for integrated economic-environmental modelling. *Journal of Environment & Development*, 25(3), 276-305.
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Horridge, J. M. y Vargas, R. (2019a). Evaluating synergies and trade-offs in achieving the SDGs of zero hunger and clean water and sanitation: An application of the IEEM Platform to Guatemala. *Ecological Economics*, 161, 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.003>
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Horridge, J. M. y Vargas, R. (2019b). The SEEA-based Integrated Economic-Environmental Modelling framework: an illustration with Guatemala's forest and fuelwood sector. *Environmental and Resource Economics*, 72(2), 539-558.
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Vargas, R. y Horridge, M. (2019c). Construction of an Extended Environmental and Economic Social Accounting Matrix from a Practitioner's Perspective, IDB Technical Note No. IDB-TN-01793. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Banerjee, O., Cicowiez, M. y Moreda, A. (2019d). Export diversification through public investment in cultural tourism: Insights from a multi-regional model of Bolivia.
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Vargas, R., Obst, C., Rojas, J. C., Alvarez-Espinosa, A. C., Melo, S., Riveros, L., Romero, G. y Meneses, D. S. (2021). Gross Domestic Product alone provides misleading policy guidance for post-conflict land use trajectories in Colombia. *Ecological Economics*, 182, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106929>
- Banerjee, O., Cicowiez, M., Macedo, M. N., Malek, Z., Verburg, P. H., Goodwin, S., Vargas, R., Rattis, L., Bagstad, K. J. y Brando, P. M. (2022). Can we avert an Amazon tipping point? The economic and environmental costs. *Environmental Research Letters*, 17(12), 1-12.
- Baranzini, A., Goldemberg, J. y Speck, S. (2000). A future for carbon taxes. *Ecological Economics*, 32(3), 395-412. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00122-6)
- Bruckner, M., Wood, R., Moran, D., Kuschnig, N., Wieland, H., Maus, V. y Börner, J. (2019). FABIO—The construction of the food and agriculture biomass input-output model. *Environmental Science and Technology*, 53(19), 11302-11312. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03554>
- Ceddia, M. G. (2019). The impact of income, land, and wealth inequality on agricultural expansion in Latin America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(7), 2527-2532. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814894116>

- Coxhead, I., Wattanakuljarus, A. y Chan, N. (2013). Are Carbon Taxes Good for the Poor? A General Equilibrium Analysis for Vietnam. *World Development* (51), 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2013.05.013>
- de la Cruz, R., Loterszpil, M. y Manzano, O. (Eds.). (2020). How to Accelerate Economic Growth and Strengthen the Middle Class in Latin America. IDB Monograph IDB-MG-782). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Dessus, S. y Herrera, R. (2000). Public Capital and Growth Revisited: A Panel Data Assessment. *Economic Development and Cultural Change*, 48 (2), 407-418. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.147231>
- Dixon, P. B., Parmenter, B. R., Powell, A. y Wilcoxon, P. J. (1992). Notes and Problems in Applied General Equilibrium Economics. North-Holland.
- Eitelberg, D. A., van Vliet, J. y Verburg, P. H. (2015). A review of global potentially available cropland estimates and their consequences for model-based assessments. *Global Change Biology*, 21(3), 1236-1248. <https://doi.org/10.1111/gcb.12733>
- European Commission, International Monetary Fund, Organization for Economic Co-operation and Development, United Nations y World Bank. (2009). System of National Accounts 2008. United Nations.
- FAO. (2023). Núcleo de Base de Datos principal de AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. Value of Agricultural Production. (2023) Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>. Fecha de Acceso: 06-07-2023.
- FMI. (2023). *World Economic Outlook 2023*. Fondo Monetario Internacional.
- Feng, K. y Chen, X. (2023). Water and land stress in Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru under coupled climate-socioeconomic scenarios. (IDB Working Paper; 1465). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Fouquet, R. (2014). Long-run demand for energy services: Income and price elasticities over two hundred years. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(2), 186-207. <https://doi.org/10.1093/reep/reu002>
- Gupta, S., Kangur, A., Papageorgiou, C. y Wane, A. (2014). Efficiency-Adjusted Public Capital and Growth. *World Development*, 57 (May), 164-178.
- Haqiqi, I., Taheripour, F., Liu, J. y van der Mensbrugghe, D. (2016). Introducing irrigation water into GTAP 9 data base. *Journal of Global Economic Analysis*. Purdue University, West Lafayette, IN: Global Trade Analysis Project (GTAP).
- Hoekstra, A. Y. y Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- Hubacek, K., Chen, X., Feng, K., Wiedmann, T. y Shan, Y. (2021). Evidence of decoupling consumption-based CO₂ emissions from economic growth. *Advances in Applied Energy*, 4, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100074>
- IEA. (2021). *World Energy Outlook 2021*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- INEI. (2020). Instituto Nacional de Estadística e Informática. <https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415416
- King, B. B. (1985). What is a SAM? En Pyatt, G y Round, J. I. (Eds.). *Social accounting matrices: A basis for planning*. Banco Mundial.
- Lowe, M, Papageorgiou, C. y Perez-Sebastian, F. (2019). The Public and Private Marginal Product of Capital. *Economica*, 86(342), 336-361.
- Lu, C., Tong, Q. y Liu, X. (2010). The impacts of carbon tax and complementary policies on Chinese economy. *Elsevier*, 38(11), 7278-7285. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.011>

- MERNNR. (2020). Balance Energético Nacional 2020. Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables de Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/09/Balance-Energetico-Nacional-2020-Web.pdf>
- MERNNR. (2021). Balance Energético Nacional 2021. Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables de Ecuador. https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Balance-Energético_Nacional_2021-VF_opt.pdf
- MINAM. (2023). INFOCARBONO. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2016. INFOCARBONO. Ministerio del Ambiente. <https://infocarbono.minam.gob.pe/inventarios-nacionales-gei/inventario-nacional-gases-efecto-invernadero-2016/>
- MINEM. (2020). Balance Nacional de Energía. Ministerio de Energía y Minas, Lima. <https://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=653>
- Mondal, M., Begum, Z. y Ramaswamy, S. (2016). Does Carbon Tax Makes Sense? Assessing Global Scenario and Addressing Indian Perspective. India. Madras School of Economics.
- Nguyen, C. T. y Scrimgeour, F. (2022). Measuring the impact of climate change on agriculture in Vietnam: A panel Ricardian analysis. *Agricultural Economics*, 53(1), 37-51. <https://doi.org/10.1111/agec.12677>
- OCDE. (2021). Water governance in Peru. OECD Studies on Water. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/568847b5-en> Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G. y Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306-312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>
- de Oliveira, A. S., Trezza, R., Holzapfel, E. A., Lorite, I. y Paz, V. P. S. (2009). Irrigation water management in Latin America. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), 7-16. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392009000500002>
- Peters, G. P., Minx, J. C., Weber, C. L. y Edenhofer, O. (2011). Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(21), 8903-8908. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006388108>
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M. C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., Song, X-P, Pickens, A., Shen, Q. y Cortez, J. (2022). Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nature Food*, 3(1), 19-28. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00429-z>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., Samir, K. C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpeöder, F., Aleluia Da Silva, L., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A. y Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Singh, H. V., Bocca, R., Gomez, P., Dahlke, S. y Bazilian, M. (2019). The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system, *Energy Strategy Reviews*, (26), 1-10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300756>
- Song, X. P., Hansen, M. C., Potapov, P., Adusei, B., Pickering, J., Adami, M., Lima, A., Zalles, V., Stehman, S. V., Di Bella, C. M., Conde, M. C., Copati, E. J., Fernandes, L. B., Hernandez-Serna, A., Jantz, S. M., Pickens, A. H., Turubanova, S. y Tyukavina, A. (2021). Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. *Nature Sustainability*, 4(9), 784-792. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z>
- Wiedmann, T. y Lenzen, M. (2018). Environmental and social footprints of international trade. *Nature Geoscience*, 11(5), 314-321. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0113-9>

- World Economic Forum. (2021). Fostering Effective Energy Transition. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2021.pdf
- Yu, Y., Feng, K., Hubacek, K. y Sun, L. (2016). Global implications of China's future food consumption. *Journal of Industrial Ecology*, 20(3), 593-602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12392>
- Zalles, V., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Parker, D., Stehman, S. V., Pickens, A. H., Leal, L., Ferreira, L. G. y Kommareddy, I. (2021). Rapid expansion of human impact on natural land in South America since 1985. *Science Advances*, 7(14), 1-11. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg1620>
- Zhang, B., Feng, G., Kong, X., Lal, R., Ouyang, Y., Adeli, A. y Jenkins, J. N. (2016). Simulating yield potential by irrigation and yield gap of rainfed soybean using APEX model in a humid region. *Agricultural Water Management*, 177, 440-453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.029>
- Zhong, H., Feng, K., Sun, L., Tian, Z., Fischer, G., Cheng, L. y Castillo, R. M. (2021). Water-land tradeoffs to meet future demands for sugar crops in Latin America and the Caribbean: A bio-physical and socio-economic nexus perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105510>

