

Opciones para lograr

la carbono-neutralidad

en Chile

Una evaluación bajo
incertidumbre



Agosto de 2021

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

Opciones para lograr la carbono-neutralidad en Chile: una evaluación bajo incertidumbre / Carlos Benavides, Luis Cifuentes, Manuel Díaz, Horacio Gilibert, Luis Gonzales, Diego González, David Groves, Marcela Jaramillo, Catalina Marinkovic, Luna Menares, Francisco Meza, Edmundo Molina, Marcia Montedónico, Rodrigo Palma, Andrés Pica, Cristian Salas, Rigoberto Torres, Sebastián Vicuña, José Miguel Valdés, Adrien Vogt-Schilb.

p. cm. — (Monografía del BID ; 945)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Carbon dioxide mitigation-Government policy-Chile. 2. Greenhouse gas mitigation-Government policy-Chile. 3. Climatic changes-Government policy-Chile. 4. Environmental policy-Chile. I. Benavides, Carlos. II. Cifuentes, Luis. III. Díaz, Manuel. IV. Gilibert, Horacio. V. Gonzales, Luis. VI. González, Diego. VII. Groves, David. VIII. Jaramillo, Marcela. IX. Marinkovic, Catalina. X. Menares, Luna. XI. Meza, Francisco. XII. Molina, Edmundo. XIII. Montedónico, Marcia. XIV. Palma, Rodrigo. XV. Pica, Andrés. XVI. Salas, Cristian. XVII. Torres, Rigoberto. XVIII. Vicuña, Sebastián. XIX. Valdés, José Miguel. XX. Vogt-Schilb, Adrien. XXI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. XXII. Serie.

IDB-MG-945

Códigos JEL: Q54, Q10, Q20, Q30, Q40, Q50

Palabras clave: mitigación del cambio climático, descarbonización, toma de decisión robusta, análisis de costo-beneficio, modelo de equilibrio general, emisiones de gases de efecto invernadero



En
apoyo a:



Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

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 CNUDMI (UNCITRAL). 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 CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



ÍNDICE

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Prefacio | 6 |
| Prólogo | 7 |
| Agradecimientos | 8 |
| Resumen ejecutivo | 9 |
| Capítulo 1: Contexto y objetivos del estudio | 17 |
| Capítulo 2: Emisiones de gases de efecto invernadero en Chile: visión sectorial | 20 |
| 2.1. Emisiones de gases de efecto invernadero por sector en Chile | 22 |
| 2.2. Proceso participativo | 24 |
| 2.3. Segunda ronda de talleres | 26 |
| Capítulo 3: Modelos sectoriales | 27 |
| 3.1. Descripción general de la herramienta de simulación | 29 |
| 3.2. Sector energía | 31 |
| 3.3. Sector de procesos industriales y uso de productos | 39 |
| 3.4. Sector residuos | 41 |
| 3.5. Sector agricultura | 42 |
| 3.6. Sector de bosques y biodiversidad | 44 |
| 3.7. Modelo macroeconómico | 47 |
| Capítulo 4: Resultados | 52 |
| 4.1. Introducción | 53 |
| 4.2. Desempeño de la estrategia de carbono-neutralidad bajo el futuro de referencia | 54 |
| 4.3. NDC con incertidumbres | 56 |
| 4.4. Análisis de vulnerabilidad | 59 |
| 4.5. Expansión de la contribución determinada a nivel nacional | 65 |
| 4.6. Incrementar la robustez de la estrategia NDC | 70 |
| 4.7. Análisis macroeconómico | 76 |
| Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones | 81 |
| Referencias | 86 |
| Anexo | 89 |
| A.1 Resultados de emisiones sectoriales | 90 |
| A.2 Organizaciones consultadas | 108 |

Cuadros

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro RE1: Medidas sectoriales en la NDC y medidas adicionales incluidas en la NDC+ ----- | 12 |
| Cuadro 3.1: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector generación eléctrica ----- | 31 |
| Cuadro 3.2: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector transporte ----- | 33 |
| Cuadro 3.3: Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en transporte ----- | 34 |
| Cuadro 3.4: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector residencial ----- | 35 |
| Cuadro 3.5: Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en el sector residencial ----- | 36 |
| Cuadro 3.6: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector industria y minería ----- | 37 |
| Cuadro 3.7: Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en industria y minería ----- | 38 |
| Cuadro 3.8: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector comercial ----- | 39 |
| Cuadro 3.9: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector de procesos industriales y uso de productos ----- | 40 |
| Cuadro 3.10: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector residuos ----- | 41 |
| Cuadro 3.11: Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en el sector residuos ----- | 42 |
| Cuadro 3.12: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector agricultura ----- | 43 |
| Cuadro 3.13: Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en agricultura ----- | 43 |
| Cuadro 3.14: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector forestal ----- | 46 |
| Cuadro 3.15: Fuente de incertidumbres asociadas a medidas de reducción de emisiones en el sector forestal ----- | 47 |
| Cuadro 4.1: Acciones adicionales incluidas en la estrategia NDC+ ----- | 65 |
| Cuadro 4.2: Gasto en inversión y operación por sector entre 2020 a 2050 descontados al 6% del plan NDC+ (en millones de dólares) ----- | 77 |

Gráficos

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico RE1: Emisiones por sector bajo la estrategia NDC, escenario de referencia ----- | 10 |
| Gráfico RE2: Emisiones netas totales bajo la estrategia NDC en 1.000 futuros ----- | 11 |
| Gráfico RE3: Emisiones netas totales para las estrategias NDC y NDC+ bajo 1.001 futuros ----- | 14 |
| Gráfico RE4: Impacto de las medidas adicionales sobre emisiones y costos ----- | 15 |
| Gráfico 2.1: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, 1990-2018 ----- | 22 |
| Gráfico 2.2: Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de gas, 1990-2018 ----- | 23 |
| Gráfico 2.3: Balance de emisiones y sumideros de gases de efecto invernadero, 1990-2018 ----- | 23 |
| Gráfico 2.4: Herramientas utilizadas para resumir y analizar los resultados de los talleres sectoriales ----- | 24 |
| Gráfico 3.1: Diagrama de la plataforma de modelación para el análisis de la Estrategia de Descarbonización de Largo Plazo ----- | 30 |
| Gráfico 3.2: Proyección de matriz de generación eléctrica ----- | 32 |
| Gráfico 3.3: Esquema de interacciones de la economía chilena en el modelo MEMO ----- | 48 |
| Gráfico 3.4: Esquema de agregación sectorial en el modelo MEMO ----- | 49 |
| Gráfico 3.5: Esquema de la estrategia de modelación con el módulo de MEMO incorporado ----- | 50 |
| Gráfico 4.1: Emisiones por sector para el escenario de referencia y la estrategia NDC ----- | 54 |
| Gráfico 4.2: Emisiones 2020 y emisiones proyectadas para 2030 ----- | 55 |
| Gráfico 4.3: Cambio en las emisiones por sector, 2019 a 2050 ----- | 56 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 4.4: Emisiones netas totales hasta 2050 en 1.000 futuros para la estrategia NDC | 57 |
| Gráfico 4.5: Cambio en las emisiones por sector para cada uno de los 1.000 futuros | 58 |
| Gráfico 4.6: Emisiones netas totales hasta 2050 en 1.001 futuros para la estrategia NDC | 59 |
| Gráfico 4.7: Ejemplo de clusterización de futuros para dos dimensiones | 60 |
| Gráfico 4.8: Análisis de sensibilidad de emisiones de 2050 respecto de factores inciertos | 61 |
| Gráfico 4.9: Factores de vulnerabilidad 1 a lo largo del tiempo y diagrama de dispersión del valor del factor 2050 y las emisiones netas en 2050 para 1.000 futuros para la estrategia NDC | 63 |
| Gráfico 4.10: Factores de vulnerabilidad 2 a lo largo del tiempo y diagrama de dispersión del valor del factor 2050 y las emisiones netas en 2050 para 1.000 futuros para la estrategia NDC | 64 |
| Gráfico 4.11: Emisiones por sector para las estrategias NDC y NDC+ bajo los supuestos del caso base | 66 |
| Gráfico 4.12: Emisiones netas totales para las estrategias NDC y NDC+ bajo 1.000 futuros | 67 |
| Gráfico 4.13: Emisiones en 2030 para supuestos de referencia y en 1.000 futuros para las estrategias NDC y NDC+ | 67 |
| Gráfico 4.14: Presupuesto de carbono (emisiones totales de 2020 a 2030) para supuestos de referencia y en 1.000 futuros para las estrategias NDC y NDC+ | 68 |
| Gráfico 4.15: Emisiones netas en 2050 versus factores de vulnerabilidad 1 para las estrategias NDC y NDC+ | 69 |
| Gráfico 4.16: Cambio en las emisiones netas para 2050 y los costos del sector | 70 |
| Gráfico 4.17: Diagrama de dispersión del cambio en las emisiones netas para 2050 por costos del sector | 71 |
| Gráfico 4.18: Cambio estimado en las emisiones y cambio en los costos, en comparación con la estrategia NDC, para las cuatro alternativas robustas | 72 |
| Gráfico 4.19: Emisiones en 2050 en 1.000 futuros para las estrategias NDC, robustas A-D y NDC+ | 73 |
| Gráfico 4.20: Presupuesto de carbono (emisiones totales de 2020 a 2030) para supuestos de referencia y en 1.000 futuros para las estrategias NDC, Robusta A y Robusta B | 74 |
| Gráfico 4.21: Cambio en emisiones estimadas, en comparación con la estrategia NDC, para las cuatro alternativas robustas y NDC+ para futuros seleccionados | 75 |
| Gráfico 4.22: Trayectoria de gastos de inversión y operación asociados al paquete NDC+ y percentiles entre 2020 y 205 | 76 |
| Gráfico 4.23: Tasa de variación anual del PIB del escenario de referencia (NDC) y NDC+ | 77 |
| Gráfico 4.24: Porcentaje de variación del nivel de producto por implementación de la NDC+ y percentiles | 78 |
| Gráfico 4.25: Porcentaje de variación del nivel de producto por implementación de la NDC+ y percentiles, por sector | 79 |
| Gráfico 4.26: Porcentaje de variación del nivel de producto por implementación de la NDC+ y percentiles, PIB por tipo de gasto | 80 |
| Gráfico A1: Proyección de emisiones del sector generación eléctrica | 90 |
| Gráfico A2: Proyección de emisiones del sector generación eléctrica para el escenario NDC+, en comparación con el escenario NDC | 91 |
| Gráfico A3: Proyección de emisiones del sector transporte para el escenario NDC | 92 |
| Gráfico A4: Proyección de emisiones del sector transporte para el escenario NDC+ | 93 |
| Gráfico A5: Proyección de emisiones para el sector residencial para el escenario NDC | 94 |
| Gráfico A6: Proyección de emisiones para el sector residencial para el escenario NDC+, en comparación con el escenario NDC | 95 |
| Gráfico A7: Proyección de emisiones del sector comercial | 96 |
| Gráfico A8: Proyección de emisiones del sector público | 97 |
| Gráfico A9: Proyección de emisiones del sector industria y minería | 98 |
| Gráfico A10: Proyección de emisiones del sector industria y minería para el escenario NDC+, en comparación con el escenario NDC | 99 |
| Gráfico A11: Emisiones de procesos industriales y uso de productos en múltiples futuros para estrategias NDC y NDC+ | 101 |
| Gráfico A12: Emisiones de residuos en múltiples futuros para estrategias NDC y NDC+ | 102 |
| Gráfico A13: Emisiones del sector agricultura para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050 | 103 |
| Gráfico A14: Emisiones totales del sector agricultura para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050, considerando incertidumbres | 104 |
| Gráfico A15: Emisiones del sector bosques y biodiversidad para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050 | 105 |
| Gráfico A16: Emisiones totales del sector bosques y biodiversidad, para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050, considerando incertidumbres | 106 |
| Gráfico A17: Histograma y distribución de frecuencias de las emisiones asociadas al sector bosques y biodiversidad en 2050, considerando una muestra de 500 futuros para las estrategias NDC y NDC+ | 107 |

Prefacio



El cambio climático es, sin duda, el mayor desafío que tenemos como generación y enfrentarlo con decisión y sentido de urgencia es, para nuestro gobierno, un imperativo ético, social y económico.

El reciente informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) establece con claridad la profundidad de los impactos del cambio climático, efectos que se manifiestan cada vez con mayor intensidad y frecuencia en el mundo entero, y Chile no es la excepción. La ciencia es clara y contundente sobre la urgente necesidad de alcanzar un objetivo universal para la reducción de emisiones, y en el que todos los países, empresas y actores no estatales deben trabajar: la carbono-neutralidad y resiliencia al cambio climático para 2050.

En esta línea, en abril de 2020 Chile presentó a las Naciones Unidas la actualización de su contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), la cual ha sido reconocida internacionalmente por el importante incremento en su ambición.

La nueva NDC de Chile establece un indicador y una meta absoluta, clara y no condicionada, de emisiones de 95 millones de toneladas equivalentes para 2030. Establece un pico de emisiones para 2025 y un presupuesto total máximo para emitir entre 2020 y 2030 que no supere los 1.100 millones de toneladas de CO₂eq.

Quiero destacar especialmente la incorporación por primera vez en una NDC de un pilar social que permea todos sus compromisos, estableciendo un proceso de transición justa para la descarbonización, así como el aporte de cada compromiso a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, que permita mejorar la calidad de vida de los chilenos en sus territorios.

Para avanzar en esta dirección y cumplir con nuestros compromisos, el gobierno del Presidente Piñera ingresó con suma urgencia al Congreso el proyecto de Ley Marco de Cambio Climático, que incluye el logro de la meta de carbono-neutralidad y resiliencia para Chile a más tardar en 2050.

Este proyecto, aprobado de forma unánime en su idea de legislar y que se tramita con suma urgencia en el Senado, permitirá que Chile cuente con un marco institucional de largo plazo que trascienda los gobiernos de turno y oriente la acción del Estado y de los privados, fijando un camino claro y decidido hacia la carbono-neutralidad y la resiliencia del país para 2050.

Chile estableció la meta de la carbono-neutralidad y de la NDC luego de un intenso trabajo basado en la ciencia, con apoyo concreto por parte del Comité Científico para el Cambio

Climático. Las transformaciones requeridas para lograr estas metas demandan herramientas e instrumentos que nos permitan implementar acciones en todos los sectores de la economía y en todas las regiones y comunas del país. Por eso, nos encontramos elaborando de manera participativa la Estrategia Climática de Largo Plazo, que presentaremos en la COP26, y que dejará asentadas las metas sectoriales de presupuestos de carbono a partir de la meta nacional presentada en la NDC.

La publicación *Opciones para lograr la carbono-neutralidad en Chile* nos confirma la robustez de nuestras metas y nos muestra que frente a diversos escenarios debemos considerar fortalecer las acciones de mitigación sectorial para disminuir la incertidumbre en el cumplimiento de las metas establecidas. Este estudio nos desafía con el análisis de más de 1.000 escenarios de incertidumbre, por lo cual resulta clave para el desarrollo y la implementación de los futuros planes de mitigación sectorial propuestos en el proyecto de Ley Marco de Cambio Climático.

Alcanzar la carbono-neutralidad para 2050 es una medida de gran beneficio para Chile. Si bien requiere una inversión del orden de US\$50.000 millones, produce ahorros directos de generación y operación, que resultan en beneficios netos para el país superiores a US\$30.000 millones y que pueden causar un aumento del 4,4% del producto interno bruto (PIB) para 2050.

Este estudio nos confirma esta evaluación y nos demuestra que, si robustecemos las acciones sectoriales, estos beneficios económicos netos pueden aumentar en un 0,8% adicional del PIB para 2050.

Gracias a un esfuerzo integral y transversal que trasciende colores políticos estamos avanzando de manera decidida con metas claras basadas en la ciencia y con una mirada de largo plazo que nos permita instalar el desarrollo sostenible como la base del progreso de nuestro país.

Es tiempo de derribar el mito de que la acción climática y la protección del medio ambiente se oponen al crecimiento económico.

Por sus características y condiciones naturales, Chile puede comprometerse con un desarrollo verde, sostenible y armonioso con la naturaleza, sin sacrificar su potencial de crecimiento y progreso.

Carolina Schmidt
Ministra del Medio Ambiente de Chile

Prólogo

Desde marzo de 2020, la pandemia del COVID-19 ha generado un enorme costo humano, económico y social en Chile. Miles de trabajadores informales se vieron afectados por el confinamiento y las cuarentenas, lo que causó una mella especial en los hogares más pobres. Además, casi 400.000 personas han caído en la pobreza extrema, duplicando su prevalencia en Chile y agravando los índices de desigualdad.

Mientras nos recuperamos de la pandemia, no podemos olvidar que nos enfrentamos a otra amenaza similar, la crisis climática, que también afecta en mayor medida a los hogares pobres y vulnerables. Por ejemplo, los mismos trabajadores informales están más expuestos a las olas de calor, porque es más probable que trabajen al aire libre.

El cambio climático también es responsable del derretimiento de los glaciares, del incremento en la frecuencia de las sequías, de la reducción en el rendimiento de terrenos agrícolas, del aumento del nivel del mar que amenaza a las ciudades costeras, y de la destrucción de la biodiversidad, entre muchos otros efectos. Y no cabe duda de que todo esto ya está teniendo graves consecuencias en la economía y las personas, como, por ejemplo, en los ingresos de quienes dependen del turismo.

La ciencia ha sido clara al señalar que, para poner fin a la crisis climática, es necesario llegar a cero emisiones netas de carbono para 2050. Alcanzar este objetivo no debe ser percibido como un sacrificio, sino como una oportunidad de crecimiento verde. De hecho, la acción climática es uno de los pilares de la Visión 2025, la hoja de ruta del Grupo BID para alcanzar un crecimiento inclusivo y sostenible.

El último informe sobre perspectivas macroeconómicas para América Latina y el Caribe del BID revela cómo un avance hacia la carbono-neutralidad podría crear 15 millones de nuevos puestos de trabajo y un 1% de crecimiento adicional en la región para 2030. De hecho, ya es sabido que la energía renovable es la más barata del mundo, y que los vehículos eléctricos son o pronto serán más económicos que los vehículos de gasolina y diésel.

Si bien los beneficios son claros, el camino hacia cero emisiones netas está lleno de obstáculos. Algunas de las regulaciones existentes pueden dificultar la adopción de tecnologías sin carbono por parte del sector privado y requerir reformas para permitir dicha adopción. Además, al reemplazar los combustibles fósiles por energías renovables, es inevitable que existan industrias a las que les cueste adaptarse.

En este camino, la ayuda de los gobiernos es fundamental. Ellos serán los encargados de implementar reformas regulatorias y de



asegurar que cumplir con los objetivos ambientales no genere problemas sociales y económicos más grandes. Para ello, es clave contar con una estrategia climática de largo plazo que logre fomentar un diálogo multisectorial, anticipar y gestionar los obstáculos para alcanzar una economía carbono-neutral, y diseñar un plan de acción para eliminar estos obstáculos y garantizar una transición justa, inclusiva y ordenada.

Este estudio muestra cómo los gobiernos pueden utilizar evidencia científica y contribuciones de un amplio abanico de partes interesadas para informar el diseño de estrategias climáticas a largo plazo. El informe recoge las observaciones de más de 140 especialistas consultados en talleres virtuales. Participaron expertos en campos como energía, transporte, procesos industriales, gestión de residuos, agricultura y silvicultura, procedentes de organismos gubernamentales, universidades, centros de estudios, empresas y organizaciones internacionales. Para llevar a cabo este estudio se aprovecharon los conocimientos técnicos de la Universidad de Chile y de la Pontificia Universidad Católica de Chile, así como la experiencia de la Corporación RAND, para simular diferentes formas de alcanzar el objetivo de carbono-neutralidad en 2050.

El análisis muestra que alcanzar la carbono-neutralidad no solo es técnicamente posible, sino que también es beneficioso para Chile. Adicionalmente, el documento anticipa algunos puntos en los que los planes actuales del gobierno se quedan cortos respecto a este objetivo. Por último, sugiere opciones para robustecer dichos planes, es decir, para hacer más seguro el alcance de cero emisiones netas para 2050.

Chile está a la vanguardia de esta agenda. Después de ser anfitrión de la COP25, fue uno de los primeros países del mundo en reconocer oficialmente el objetivo de alcanzar cero emisiones netas para 2050 en su contribución determinada a nivel nacional. Seguimos comprometidos en apoyar al país hacia el cumplimiento de esta meta, que además nos brindará la experiencia necesaria para ayudar a otros países de la región a hacer lo mismo.

María Florencia Attademo-Hirt

Gerente General de Países del Cono Sur y Representante del Grupo BID en Chile

Agradecimientos

Este documento ha sido escrito por Carlos Benavides, Manuel Díaz, Marcia Montedonico, Rodrigo Palma-Behnke y Rigoberto Torres del Centro de Energía de la Universidad de Chile; Luis Cifuentes, Diego González, Horacio Gilabert, Catalina Marinkovic, Luna Menares, Francisco Meza, Andrés Pica-Téllez, Sebastian Vicuña y José Miguel Valdés del Centro Cambio Global UC; Luis Gonzales del Centro Latinoamericano de Políticas Económicas y Sociales UC; Edmundo Molina-Pérez del Tecnológico de Monterrey; David Groves y James Syme de Rand Corporation; y Marcela Jaramillo, Cristian Salas y Adrien Vogt-Schilb del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Agradecemos profundamente a la jefa de la Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Ambiente, Carolina Urmeneta, por su apoyo en la realización de este proyecto, así como a Cristóbal Muñoz, consultor, por su apoyo en la coordinación. Deseamos plasmar también nuestro especial agradecimiento a Jenny Mager y Bruno Campos del Ministerio del Medio Ambiente, y a Carlos Barría, jefe de la División de Políticas y Estudios Energéticos y Ambientales del Ministerio de Energía, por su compromiso en el proyecto.

Asimismo, acercamos nuestro reconocimiento a los ministerios y otras entidades gubernamentales por su compromiso con este proyecto, en particular a los profesionales de los ministerios de Energía, Minería, Hacienda, Obras Públicas, Transportes, Vivienda y Urbanismo, y Agricultura, que colaboraron a lo largo del estudio con información y también en su revisión.

Nuestro sincero agradecimiento se extiende a cada uno de los más de 140 participantes de los talleres, incluidos los representantes del sector público, del sector privado, del ámbito

académico, de organizaciones no gubernamentales, del BID y de otros organismos internacionales, que activamente brindaron insumos valiosos para este proyecto.

Agradecemos a los expertos de los sectores agricultura y Bosques y biodiversidad Paulina Fernández, Pablo Becerra, Eduardo Arellano, Rafael Larraín, Oscar Melo, Daniela Álvarez (Chilecarne) y Jaqueline Espinoza (ODEPA), por su disposición a ser entrevistados y colaborar desde sus diversas áreas de conocimiento en la validación y discusión de muchos de los supuestos e incertidumbres que se consideraron en el desarrollo del proyecto.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento a los siguientes revisores, que proporcionaron valiosos comentarios en el proceso de revisión final del documento: María José García y Rubén Guzmán del Ministerio de Energía; Rodrigo Henríquez y Ruben Triviño del Ministerio de Transportes; Evelyne Medel del Ministerio de Obras Públicas; Hipólito Talbot-Wright de la DIPRES, Pablo Marquet y Daniela Manuschevish del Comité Científico; Ana Bucher y José Rehbein del Banco Mundial; Aimée Aguilar y Mariana Mirabile de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), y Pablo Angelelli del BID.

Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Francés para el Clima del BID (RG-T3575 y RG-T3193) y el programa de estudios económicos y sectoriales del BID (RG-K1447). Fue coordinado por Marcela Jaramillo desde el inicio del proyecto y hasta su salida del BID, y después por Cristian Salas y Adrien Vogt-Schilb.

La edición y lectura de pruebas ha estado a cargo de Claudia M. Pasquetti; Sahadia Yusari se ha ocupado del diseño gráfico.

Resumen ejecutivo

El gobierno de Chile busca alcanzar la neutralidad de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050. Así lo establece su contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), que el país comunicó a la comunidad internacional en el marco del Acuerdo de París (Gobierno de Chile, 2020). Este objetivo está alineado con los esfuerzos internacionales requeridos para detener el aumento de la temperatura promedio global entre 1,5 °C y 2°C (IPCCC, 2018).

La NDC incluye objetivos de reducción de emisiones: mantener las emisiones GEI por debajo de 95 MtCO₂eq para 2030, definir como fecha límite para el nivel máximo de emisiones el año 2025 y mantener el presupuesto de emisiones de GEI por debajo de 1.100 MtCO₂eq para el período 2020-30.

Esta ambición climática da pie para dos grandes desafíos de política pública. Por un lado, se necesitan diversas acciones sectoriales para cumplir con el objetivo de carbono-neutralidad; por ejemplo, electrificación del transporte, retiro gradual de centrales de carbón, reforestación (véase el [cuadro RE1](#)). Por otro lado, la consecución exitosa de los objetivos de la NDC depende de un amplio abanico de factores inciertos que determinarán el desempeño y los costos de estas acciones en el futuro, como incendios forestales, costos de tecnologías de bajas emisiones, o crecimiento de la demanda de electricidad.

En respuesta a estos desafíos, este estudio provee evidencia científica para robustecer las políticas públicas para reducir emisiones en cada sector. El trabajo estima qué transformaciones sectoriales se requieren para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones en una amplia gama de escenarios económicos, ambientales y tecnológicos.

Identifica condiciones que ponen en riesgo los objetivos de reducción de emisiones. Luego, desarrolla propuestas de expansión de medidas a considerar en los futuros planes sectoriales que mitiguen las vulnerabilidades identificadas. Esto incluye reforzar acciones existentes y agregar acciones adicionales.

El estudio se llevó a cabo siguiendo el marco de toma de decisiones robustas en un proceso participativo. Primero, se convocaron 148 actores provenientes de los sectores público y privado, el ámbito gremial, organizaciones no gubernamentales (ONG), la academia y organismos internacionales. Esta convocatoria permitió generar diálogos temáticos para la estructuración del estudio, y contar con sugerencias de mejora para el mismo y recomendaciones sobre la inclusión de acciones adicionales a las planteadas actualmente.

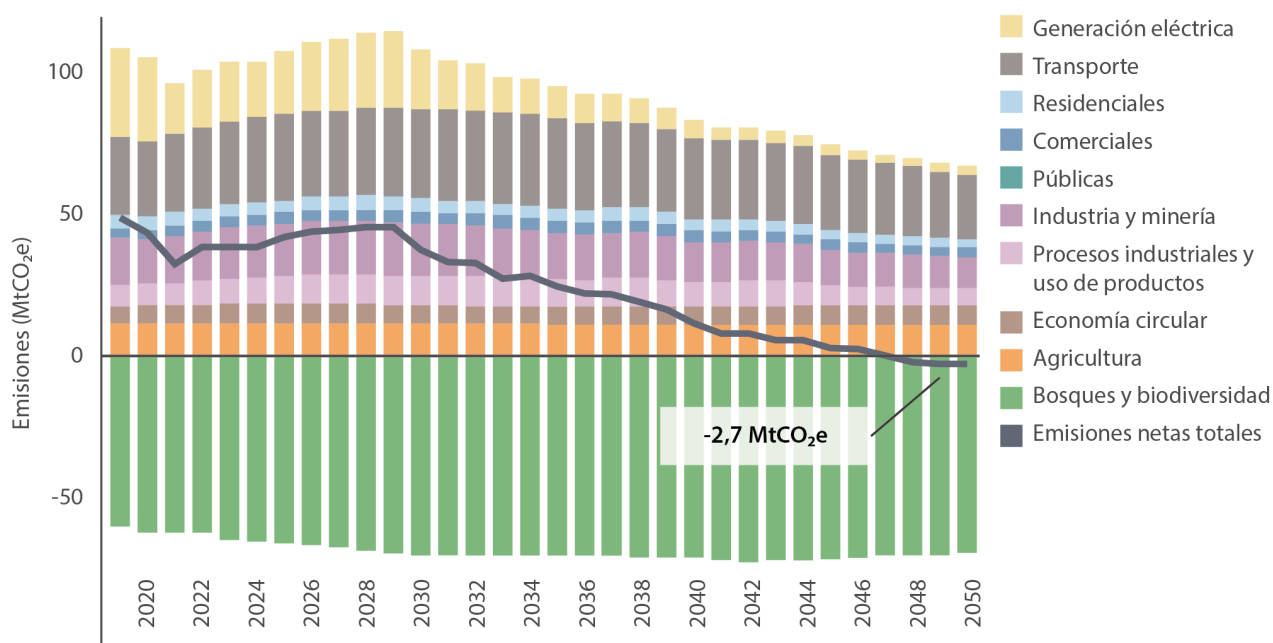
Después, se elaboró el primer modelo para la evaluación integrada de las emisiones de GEI en Chile. Esta nueva herramienta combina modelos existentes y modelos desarrollados para este proyecto, y cubre todos los sectores del inventario de GEI: energía (generación eléctrica, transporte, industria, minería y edificios), procesos industriales y uso de productos, economía circular (residuos), bosques y biodiversidad (uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura) y agricultura. Además, el modelo permite llevar a cabo un análisis bajo incertidumbre en centenares de escenarios diferentes.

En un escenario de referencia, el estudio encuentra que las transformaciones sectoriales indicadas en la NDC pueden permitir alcanzar la carbono-neutralidad en 2050, pero podrían no alcanzar los objetivos de reducción de emisiones para 2030 ([gráfico RE1](#)). El escenario de referencia se basa en las suposiciones que el gobierno

utilizó para diseñar medidas sectoriales para cumplir con los objetivos de la NDC. En ese escenario, la disminución de emisiones en el sector eléctrico y el incremento en el secuestro de carbono en el sector de bosques y biodiversidad permiten llegar a emisiones netas ligeramente negativas en el largo plazo. Sin embargo, en el

mediano plazo, las emisiones del sector eléctrico disminuyen, pero no lo suficiente como para compensar los incrementos en los sectores transporte, edificios, comercial, agricultura, economía circular e industria y minería.

Gráfico RE1:
Emisiones por sector bajo la estrategia NDC, escenario de referencia



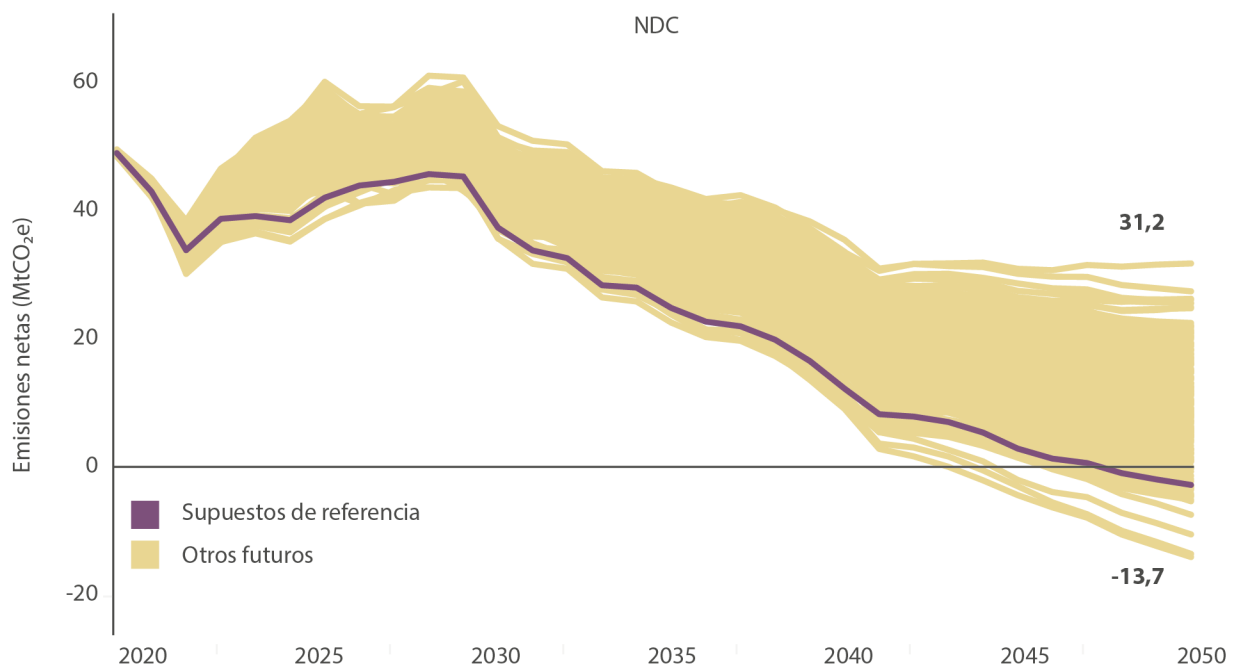
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la construcción de 1.000 futuros diferentes, el estudio muestra que las medidas sectoriales consideradas por el gobierno se deben robustecer para garantizar la carbono-neutralidad para 2050 (gráfico RE2). El conjunto de futuros se desarrolló abarcando decenas de factores de incertidumbre sugeridos en los talleres participativos, como los de índole económica (por ejemplo, niveles de

producción de actividades mineras), tecnológica (costos de baterías) y ambiental (por ejemplo, capacidad de secuestro de los bosques). El gráfico RE2 muestra el desempeño de las medidas de la NDC bajo cada uno de estos futuros. Muchas trayectorias terminan muy por arriba del objetivo de carbono-neutralidad: un 71% de los escenarios presentados acaban por encima de 5 MtCO₂eq.

Gráfico RE2:

Emisiones netas totales bajo la estrategia NDC en 1.000 futuros










Fuente: Elaboración propia.

El estudio identifica en qué condiciones las medidas fallan en alcanzar la meta de cero emisiones netas para 2050. Uno de los factores más determinantes es un bajo nivel de secuestro de los bosques combinado con una baja electrificación del transporte privado. Si la tala de bosques o los incendios forestales ocurren con alta frecuencia, las condiciones climáticas o económicas llevan a bajos rendimientos de bosques nativos y plantaciones, y no se cumple con las metas de electromovilidad, es probable que no se alcance la carbono-neutralidad. Otros escenarios que no llegan a la meta son los que combinan un alto costo de la tecnología solar térmica, alta intensidad energética de la producción de cobre, baja electrificación de la minería de cobre, y baja penetración de hidrógeno en el transporte de carga.

Se estudiaron diferentes opciones de robustecimiento del conjunto de medidas para mitigar las vulnerabilidades identificadas. Se simuló el desempeño de una estrategia NDC+, que considera medidas sectoriales complementarias a las listadas en la NDC (cuadro RE1). Estas medidas no representan una propuesta oficial de mejoramiento de la NDC de parte de los organismos del gobierno, sino que están basadas en algunas de las ideas de los expertos consultados durante el proceso participativo para robustecer la acción sectorial y lograr el cumplimiento de la NDC.

Cuadro RE1:**Medidas sectoriales en la NDC y medidas adicionales incluidas en la NDC+**

| Sector | Transformación sectorial | NDC | NDC+ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Generación eléctrica | Retiro gradual de centrales de carbón | Retiro gradual de centrales de carbón para 2040. | Retiro gradual de centrales de carbón para 2030. |
| | Retiro de centrales de gas natural | - | Retiro de centrales de gas natural para 2050. |
|  Transporte | Electromovilidad | Vehículos particulares: un 58% a 2050; taxis: un 100% a 2040 y 2050; transporte público: un 100% a 2040. | Vehículos particulares: un 58% a 2050; taxis: un 100% a 2040 y 2050; transporte público: un 100% a 2040. |
| | Hidrógeno | Transporte de carga: un 85% a 2050; aviación: un 0% a 2050. | Transporte de carga: un 85% a 2050; aviación: un 10% a 2050. |
| | Cambio modal a transporte público | - | Cambio modal a transporte público; un 10% desde transporte privado a 2050. |
| | Bicicleta | - | Un 10% desde transporte privado a 2050. |
| | Teletrabajo | - | Un 10% desde transporte privado a 2050. |
|  Comercial | Electrificación de usos finales | Un 70% de demanda a 2050. | Un 70% de demanda a 2050. |
|  Industria y minería | Sistemas solares térmicos | Un 33% en industrias varias a 2050; un 16% en minería de cobre a 2050. | Un 46% en industrias varias a 2050; un 30% en minería de cobre a 2050. |
| | Hidrógeno: usos en procesos térmicos | Un 3% en industrias varias; un 0% en la industria del acero. | Un 3% en industrias varias; un 10% en la industria del acero (+10% biomasa). |
| | Hidrógeno: usos motrices | Un 37% para minería rajo abierto a 2050; un 8% para minería subterránea a 2050; un 12% en industrias varias a 2050; un 21% en minas varias a 2050. | Un 37% para minería rajo abierto a 2050; un 8% minería subterránea a 2050; un 12% en industrias varias a 2050; un 21% en minas varias a 2050. |
| | Electrificación de usos motrices | Un 88% en industrias varias a 2050; un 74% en minas varias a 2050. | Un 88% en industrias varias a 2050; un 74% en minas varias a 2050. |
| | Electrificación de usos del cobre | Un 57% en uso final bajo cielo abierto. | Un 57% en uso final bajo cielo abierto. |
|  Residencial | Calefacción eléctrica residencial | Un 56% en casas a 2050; un 70% en departamentos a 2050. | Un 72% en casas a 2050; un 89% en departamentos a 2050. |
| | Electrificación para cocción | Un 36% en casas a 2050; un 35% en departamentos a 2050. | Un 36% en casas a 2050; un 35% en departamentos a 2050. |
| | Sistemas solares térmicos | Un 52% de agua caliente sanitaria (ACS) en casas; un 57% de ACS en departamentos. | Un 80% de ACS en casas; un 80% de ACS en departamentos. |
| | Reacondicionamiento térmico | Entre 570.00 y 650.000 casas. | Un total de 6.197.750 casas. |
|  Procesos industriales y uso de productos | Control del consumo de hidrofluorocarburos (HFC) | Según la Enmienda de Kigali. | Aumento de la capacidad de regeneración de HFC en 2.750 t HFC/año para 2030. |
|  Economía circular | Biogás | Captura y combustión de biogás en el 100% de los rellenos sanitarios para 2030. | Captura y combustión de biogás en el 100% de los rellenos sanitarios para 2030. |
| | Tratamiento de aguas servidas | Nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas para cubrir las cinco ciudades con más cantidad de población para 2040. | Nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas para cubrir las cinco ciudades con más cantidad de población para 2040. |
| | Nuevas plantas de compostaje | Un 70% de las vacas lecheras con aditivo que reduce la fermentación entérica para 2037. | Un 70% de las vacas lecheras con aditivo que reduce la fermentación entérica para 2037. |

| Sector | Transformación sectorial | NDC | NDC+ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agricultura  | Cambio de dieta bovina | Crecimiento de biodigestores porcinos en un 71% de cabezas para 2040. | Crecimiento de biodigestores porcinos en un 71% de cabezas para 2040. |
| | Biodigestores | Reducción de hasta un 11% del consumo total de fertilizantes para 2035, considerando cereales y semilleros (20%), para cultivos industriales y forrajeras (15%). | Se reduce hasta un 11% del consumo total de fertilizantes para 2035, considerando cereales y semilleros (20%), para cultivos industriales y forrajeras (15%). |
| | Uso eficiente de fertilizantes | - | Aplicación de enmiendas orgánicas al 10% de la superficie de cultivos anuales; se utiliza enmienda orgánica para 2040, comenzando en 2030. |
| | Agricultura regenerativa (aplicación de enmienda orgánica) | - | Reducción del consumo de carne bovina a 2050 (10%). |
| | Cambio de dieta nacional | - | Un 10% del ganado en pastoreo en la Región de Los Lagos para 2039. |
| | Manejo holístico de ganado | Aumento en 200.000 hectáreas la superficie bajo planes de manejo a 2030. | Aumento en 200.000 hectáreas la superficie bajo planes de manejo a 2030 y en 350.000 a 2050. |
| Bosques y biodiversidad  | Planes de manejo forestal | 200.000 hectáreas forestadas para 2030. | 200.000 hectáreas forestadas para 2030 y 500.000 para 2050. |
| | Forestación | Reducción en un 25% de la degradación forestal a 2030. | Reducción en un 25% de la degradación forestal a 2030. |
| | Disminución de la sustitución y degradación | - | Aumento en 1 millón de hectáreas de las zonas de parques y reservas para 2050; 1.000 hectáreas de bosques de algas pardas bajo manejo sostenible para 2030. |
| | Conservación | - | Un 10% menos de producción de papel, en favor de más madera aserrada. |
| | Cambio en la matriz de productos de madera recolectada | - | Un 10% menos de producción de papel, en favor de más madera aserrada. |

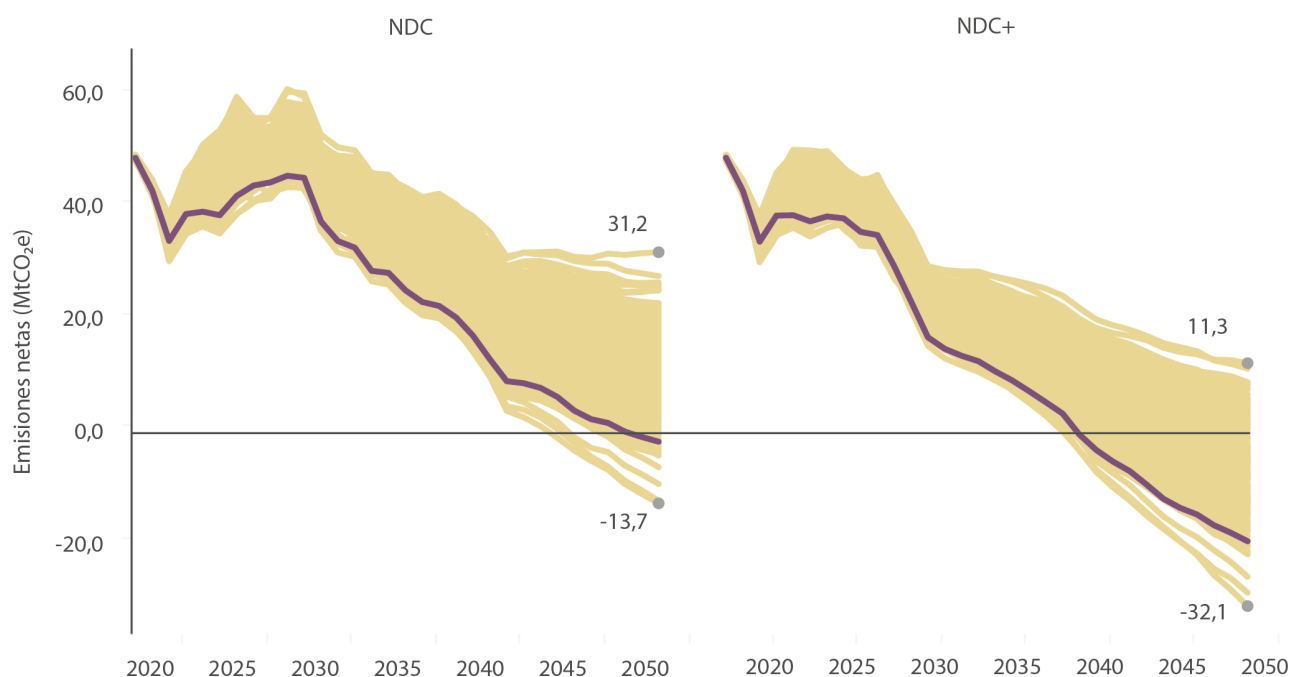
Fuente: Elaboración propia.

La estrategia NDC+ cumple con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050 en un mayor número de escenarios futuros que la estrategia NDC original (gráfico RE3). El 83% de las simulaciones de la estrategia NDC+ resultan en emisiones netas negativas o nulas para 2050.

Además, la estrategia NDC+ cumple en una proporción considerable de los futuros analizados con el objetivo de reducción de emisiones para 2030.

Gráfico RE3:

Emisiones netas totales para las estrategias NDC y NDC + bajo 1.001 futuros

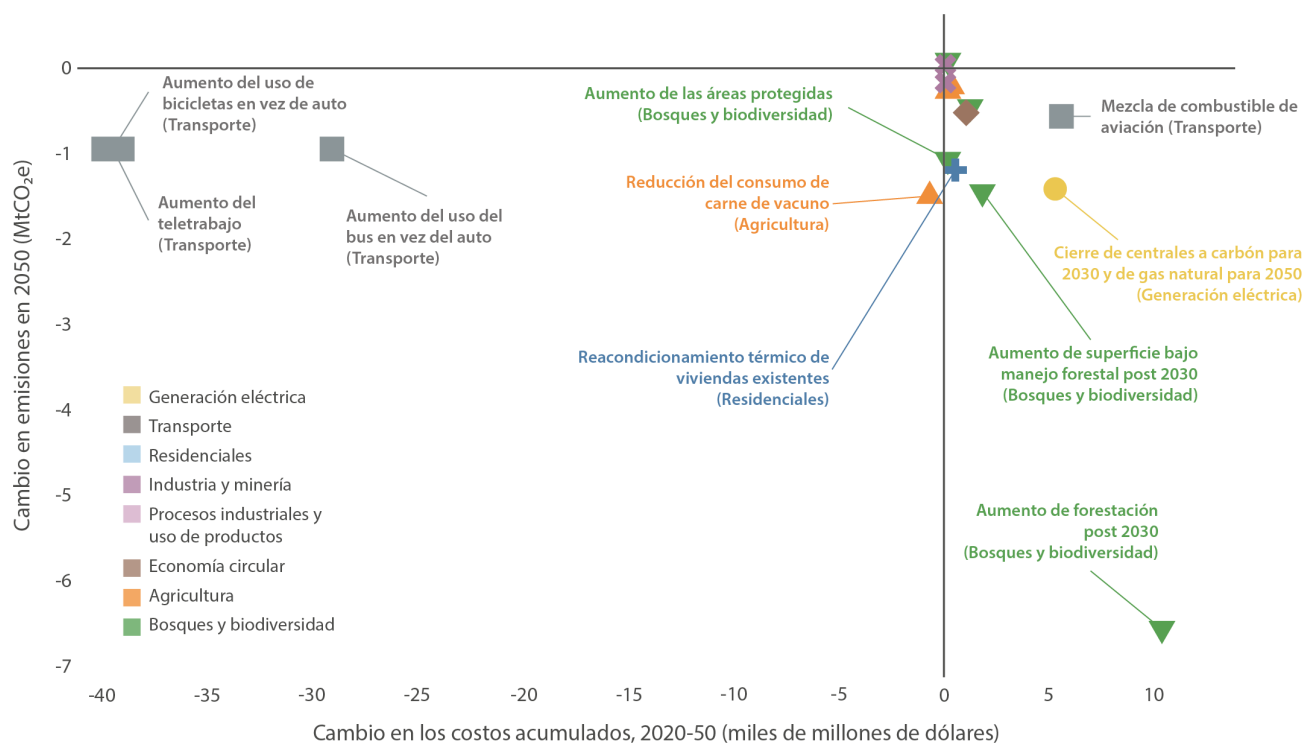


Fuente: Elaboración propia.

Las medidas adicionales incluidas en la NDC+ varían en costo e impacto sobre las emisiones (gráfico RE4). Se destacan cuatro grupos de medidas. Primero, acciones que reducen los costos y también las emisiones, como la sustitución del transporte privado por un mayor uso de las bicicletas, el teletrabajo y el transporte público. Segundo, acciones con un costo cercano a cero, pero con un impacto sustancial en la reducción de emisiones, como el incremento de las zonas protegidas, un menor consumo de carne de vacuno, el reacondicionamiento térmico de las viviendas existentes y el aumento de la superficie bajo manejo forestal.

Tercero, acciones con un mayor costo respecto de su capacidad de reducción de emisiones para 2050, como utilizar la mezcla de combustibles en la aviación y avanzar el calendario de cierre gradual de las centrales de carbón. Finalmente, el cuarto grupo incluye acciones de alto impacto en las emisiones y también alto costo, como el aumento de la forestación.

Gráfico RE4:
Impacto de las medidas adicionales sobre emisiones y costos



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La estimación de costo-impacto se realizó de manera individual para cada medida. El cambio en emisiones se estima en MtCO_{2e} en 2050, el cambio en costos se estima en millones de dólares sin descontar.

El análisis sugiere oportunidades para robustecer el conjunto de medidas incluidas en la NDC. Varias medidas permitirían disminuir emisiones a costo nulo o negativo (teletrabajo, transporte no motorizado, reducción del consumo de carne de vacuno, reacondicionamiento térmico de viviendas). Si son factibles desde un punto de vista político e institucional, deberían incluirse de manera prioritaria. Para cumplir con el objetivo de reducción a 2030, el retiro acelerado de las centrales eléctricas de carbón puede desempeñar un papel central. En el mediano plazo, qué medidas pueden implementarse para garantizar que las emisiones se mantengan en la trayectoria adecuada depende de cómo evolucionen los costos de las tecnologías, la intensidad energética de las actividades industriales, la capacidad de secuestro de carbono de los bosques y de cuán exitosas sean otras acciones incluidas en la NDC.

El sector de bosques y biodiversidad es clave para alcanzar la carbono-neutralidad. Para 2050, debe absorber tanto carbono como el que emiten todos los otros sectores juntos, o incluso absorber más aún. Esto se podría lograr gracias a medidas adicionales a la estrategia NDC, como la extensión de las medidas de forestación y de manejo forestal, y soluciones basadas en la naturaleza. Estas medidas además generan múltiples co-beneficios, pero dependen de fuertes incentivos económicos para su realización.

Implementar la estrategia NDC+ tendría un impacto macroeconómico positivo. La tasa de crecimiento anual del producto interno bruto (PIB) podría aumentar 0,06 puntos porcentuales por encima de la estrategia NDC. Esto haría que el nivel del PIB fuese mayor en un 0,8% en

promedio en 2050 con respecto a la NDC. El análisis macroeconómico también sugiere la necesidad de introducir las medidas de reducción de emisiones con gradualidad, para evitar caídas bruscas del producto agregado y sectorial en la actividad.

Sin embargo, el análisis económico que se presenta en este estudio es limitado. Solo se consideran los costos de capital y costos operativos asociados a cada acción. No se incluyen posibles beneficios económicos (por ejemplo, menor contaminación ambiental, menor congestión en el transporte), ni sociales (como la creación de empleo), aunque otros estudios realizados en América Latina sugieren que estos podrían ser sustanciales (Groves et al., 2020; Quirós-Tortós et al., 2021; Saget et al., 2020).

Finalmente, si bien este trabajo demuestra que es posible y deseable implementar las transformaciones necesarias para alcanzar la carbono-neutralidad, no informa sobre el diseño, la efectividad ni los tiempos de implementación ligados a las políticas públicas necesarias para implementar las medidas de reducción de emisiones evaluadas. Para ello, queda disponible como herramienta de análisis el modelo integrado de simulación desarrollado en el marco del proyecto.



1

Contexto y objetivos del estudio



La contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile establece el objetivo de llegar a cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050 (Gobierno de Chile, 2020). Esta meta está alineada con lo que los científicos determinaron que es necesario lograr a nivel mundial para cumplir con el objetivo más ambicioso del Acuerdo de París: limitar el aumento de la temperatura tan cerca de 1,5 °C como resulte posible (IPCC, 2018). Además, la evidencia internacional sugiere que avanzar hacia cero emisiones netas puede traer beneficios económicos y sociales, como aumentar el crecimiento económico y la creación de empleo (Vogt-Schilb, 2021).

Las Estrategias Climáticas de Largo Plazo permiten establecer una visión de una economía carbono-neutral, facilitar la identificación de obstáculos en el camino, e informar el diseño de planes de gobierno para avanzar hacia cero emisiones netas (BID y DDPLAC, 2019). En Chile, la Estrategia Climática de Largo Plazo propone metas e indicadores sectoriales para facilitar este proceso (Gobierno de Chile, 2021). La Estrategia está formulada por el Ministerio del Medio Ambiente, en estrecha colaboración con otros ministerios sectoriales y sectores interesados, para garantizar su viabilidad, relevancia y aceptación.

Existen varios desafíos en el camino hacia la carbono-neutralidad. Uno es que alcanzar cero emisiones netas exige la participación y coordinación de un amplio grupo de sectores de la economía, que pueden tener puntos de vista y prioridades diferentes. Otro es que una estrategia para 2050 necesariamente enfrenta incertidumbres profundas que pueden poner en peligro el cumplimiento de cualquier plan de largo plazo.

En este contexto, el gobierno de Chile buscó apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para analizar, en colaboración con representantes de los sectores más emisores de GEI, las incertidumbres y riesgos asociados a la actual estrategia, y proponer opciones para robustecerla. En el estudio participaron la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad de Chile, la Corporación RAND y el Tecnológico de Monterrey.



El estudio siguió el método de toma de decisiones robustas. La finalidad de la toma de decisiones robustas es poner en marcha políticas que satisfagan los objetivos de los encargados de la toma de decisiones en múltiples futuros posibles, en lugar de la toma de una decisión óptima que es válida en solamente una estimación del futuro (Lempert y Kalra, 2011). En lugar de utilizar modelos y datos para evaluar políticas bajo un solo conjunto de suposiciones, se ejecutan experimentos computacionales considerando cientos o miles de conjuntos diferentes de suposiciones para describir cómo se desempeñan los planes en muchas condiciones plausibles. En el caso de estrategias climáticas de largo plazo, el método permite evaluar en qué condiciones las estrategias de reducción de emisiones tienen más beneficios que costos, y permiten identificar qué transformaciones sectoriales son más importantes para llegar al objetivo de cero emisiones netas (Groves et al., 2020; Quirós-Tortós et al., 2021).

El análisis se desplegó en varias etapas. Primero se llevó a cabo un proceso participativo, en conjunto con actores clave de la sociedad civil, el sector privado, el sector público, la academia y organismos multilaterales, para construir un marco para la toma de decisiones. Este marco

destaca criterios de evaluación de la Estrategia Climática de Largo Plazo, lista acciones que se pueden realizar en cada sector para llegar a los objetivos perseguidos, enumera incertidumbres que pueden afectar la capacidad de esas acciones para cumplir esos objetivos, y compila datos y modelos existentes para cuantificar el vínculo entre dichos criterios, acciones e incertidumbres. El capítulo 2 provee un desglose de las fuentes de emisiones de GEI por sector en Chile, es decir generación y transformación de energía, transporte, industria y minería, bosques, agricultura y ganadería, y residuos, y describe el proceso participativo con representantes de dichos sectores.

Después, se ha desarrollado un modelo integrado de evaluación de las emisiones futuras de GEI, considerando la gama de transformaciones que se requerirá en cada uno de esos sectores y su impacto macroeconómico. Este modelo, que se describe en el capítulo 3, permite la exploración de diferentes supuestos sobre el futuro para reflejar las preocupaciones de los actores mencionados, y proponer insumos para una estrategia de carbono-neutralidad más robusta para Chile. El capítulo 4 provee los resultados del análisis. En el último capítulo se exponen conclusiones y recomendaciones de políticas.



2

Emisiones de gases de efecto invernadero en Chile: visión sectorial



En el inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las emisiones se desglosan en cinco sectores: i) energía (que incluye generación de electricidad, uso de energía en los edificios, y uso de energía en el transporte); ii) agricultura; iii) uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura; iv) residuos, y v) procesos industriales y uso de productos.

En el presente reporte, la palabra “sector” se refiere a estas categorías, bajo las cuales se analizan las fuentes de emisiones de GEI. Cada sector de emisiones de GEI corresponde a diferentes ministerios sectoriales, o a diferentes sectores de actividad económica en Chile. Por ejemplo, el Ministerio de Obras Públicas está involucrado con actividades de transporte y generación de electricidad, que se reflejan en estos rubros en el inventario de emisiones, y las actividades económicas relacionadas con el turismo generan emisiones en el transporte y en los edificios.

A continuación, se presentan las emisiones históricas y recientes por sector. Luego se expone el proceso utilizado por el equipo para coleccionar insumos de partidas interesadas en cada sector.

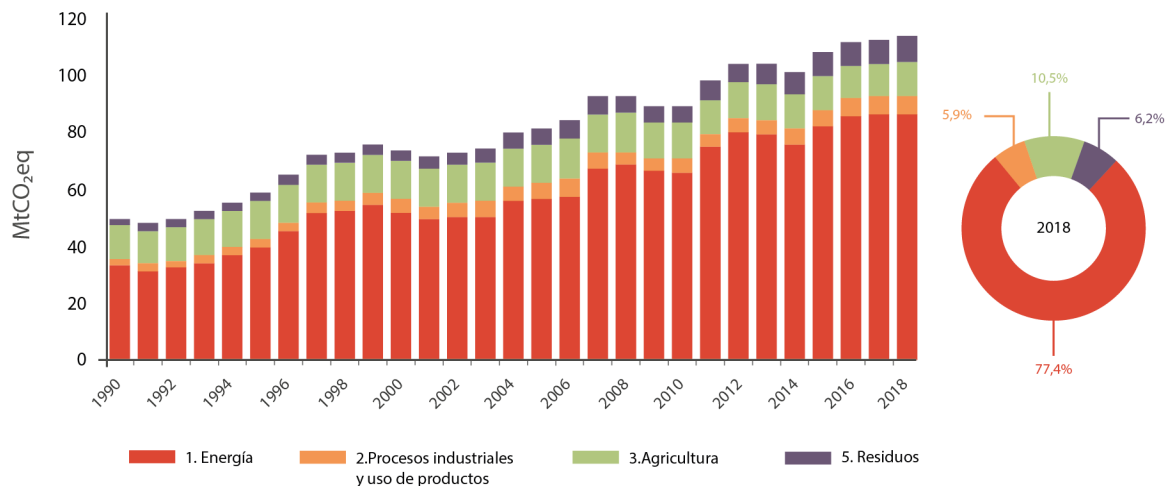


2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero por sector en Chile

La principal fuente de emisiones de GEI de Chile es la quema de combustibles fósiles para generación de energía. El gráfico 2.1 muestra las emisiones por sector, omitiendo de momento las capturas del sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (véase más adelante). El sector energía es el principal emisor nacional de GEI, con el 77,4% de las emisiones totales de GEI en 2018.

Dentro del mismo, la generación de electricidad es la fuente más importante de emisiones, con un 29%, seguida por el 25% del transporte, el 14% de las industrias manufactureras y la construcción, y finalmente el 7% el resto de los subsectores. Al sector energía le siguen agricultura (10,5%), residuos (6,2%), y procesos industriales y uso de productos (5,9%).

Gráfico 2.1: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, 1990-2018

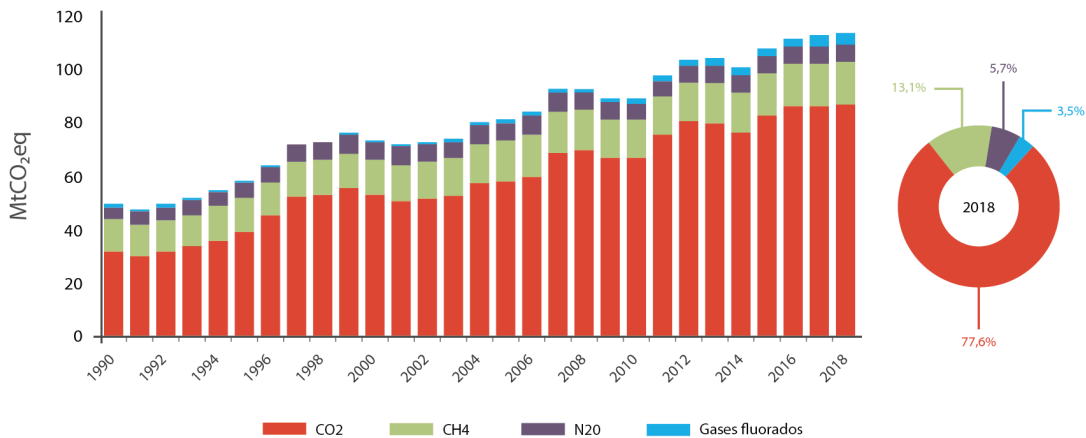


Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018).

El principal GEI es el dióxido de carbono (CO₂). El gráfico 2.2 muestra las emisiones de GEI por tipo de gas, omitiendo de nuevo las capturas del sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. El principal GEI es el CO₂, con un 77,6% de las emisiones para 2018, seguido por el metano (CH₄) (13,1%), el óxido nitroso (N₂O) (5,7%) y los gases fluorados (3,5%). Las emisiones de CO₂ provienen principalmente de los sectores energía y uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura, mientras que en agricultura se concentran CH₄ y N₂O; en procesos

industriales y uso de productos, se encuentran gases fluorados, y en residuos, CH₄. Esta distribución de emisiones tiene relevancia al considerar la duración (vida media) en la atmósfera de los distintos GEI, la que puede variar entre algunos años (CH₄) y cientos de años (CO₂ y N₂O), por lo que al pensar en la reducción de emisiones en el mediano plazo cobra relevancia el control de las emisiones de los contaminantes climáticos de corta existencia.

Gráfico 2.2:
Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de gas, 1990-2018

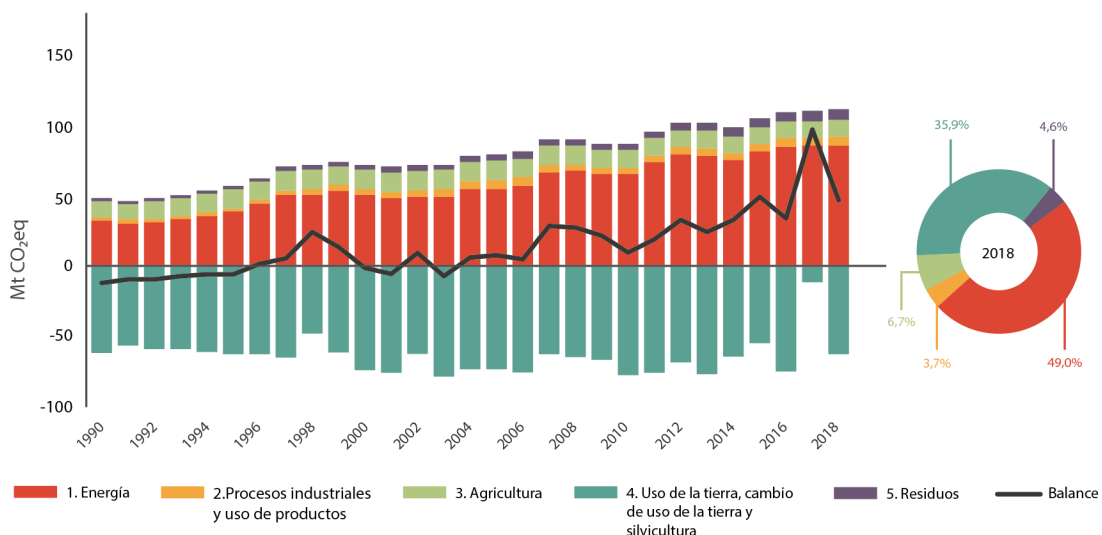


Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018).

Finalmente, las emisiones de GEI de Chile están en gran parte compensadas por absorciones en sumideros de carbono naturales (gráfico 2.3). El sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura arroja emisiones netas negativas, gracias a tasas de reforestación positivas. Para 2018 el sector representaba un -36,3% del balance de emisiones de GEI. Esto es inusual y podría cambiar en el futuro; de hecho, en 2017 las emisiones del sector fueron

63 MtCO₂eq mayores que en 2016, producto de una temporada de incendios forestales muy intensa. Gestionado adecuadamente, el sector representa una gran oportunidad para alcanzar la carbono-neutralidad. Por otro lado, puede verse severamente impactado por estresores climáticos y económicos inciertos, por ejemplo, una mayor incidencia de incendios forestales derivada de cambios en los patrones de temperatura y precipitación.

Gráfico 2.3:
Balance de emisiones y sumideros de gases de efecto invernadero, 1990-2018



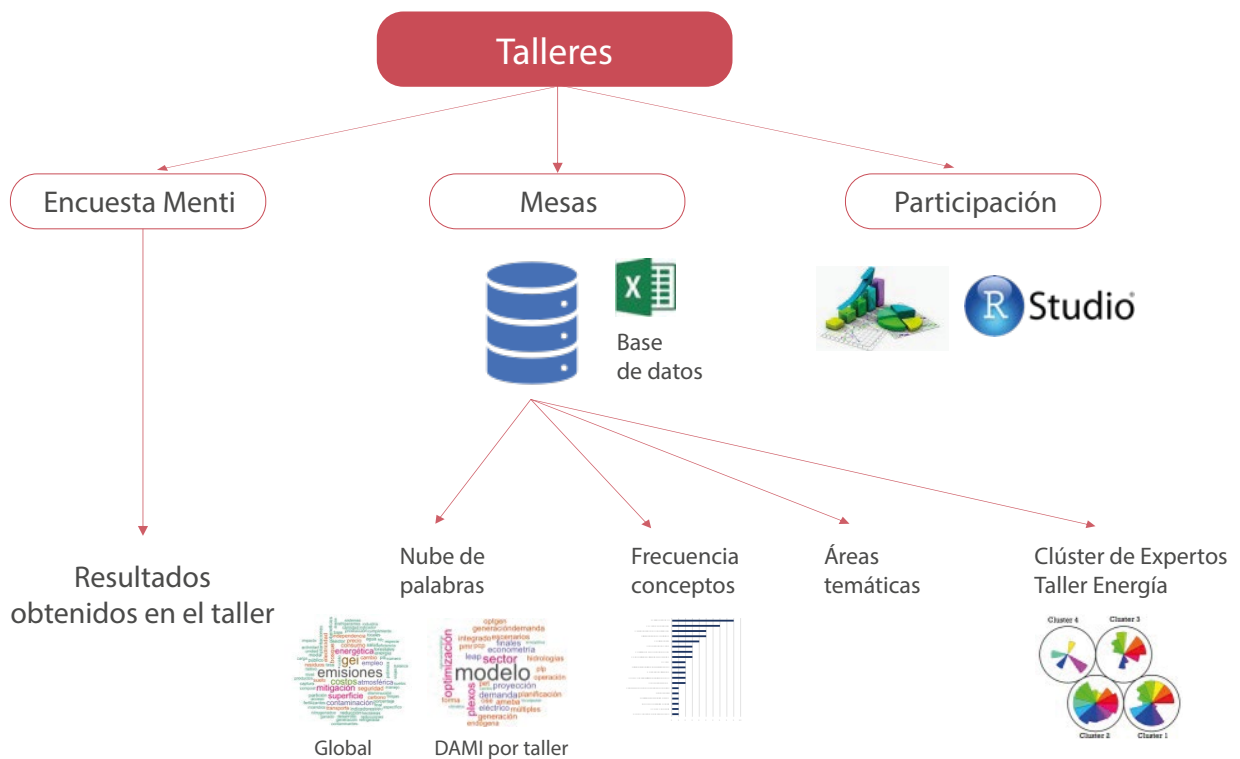
Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018).

2.2 Proceso participativo

La primera etapa del estudio consistió en consultar a actores de la sociedad civil, el sector privado, el sector público, la academia y organismos multilaterales, para construir un marco para la toma de decisiones. Este proceso participativo constó de dos instancias de talleres: una en junio de 2020 y la siguiente en diciembre del mismo año. En la primera instancia se realizaron seis talleres sectoriales, enfocados respectivamente en energía; transporte y desarrollo urbano; industria, minería e infraestructura; forestal y biodiversidad; agricultura/ganadería, y residuos. En ellos participaron 148 actores provenientes los sectores público, privado y gremial, organizaciones no gubernamentales, la academia y organismos internacionales. Esta convocatoria diversa permitió generar diálogos temáticos para la estructuración de un marco de decisiones dentro del cual fuese posible evaluar estrategias para alcanzar la

neutralidad en emisiones de GEI para 2050. Durante estos talleres, expertos y actores claves fueron invitados a expresar sus visiones acerca de sus prioridades y métricas de desempeño, acciones que en cada sector puedan contribuir a la descarbonización, datos y modelos existentes, e incertidumbres que se deberían considerar. Esta información se conoce como la matriz DAMI (Desempeño, Acciones, Modelos, Incertidumbres) en el cuadro de toma de decisiones robustas. Los talleres se cursaron de manera digital a través de la plataforma Miro y presentaron encuestas a través de la plataforma Menti. Sus resultados fueron analizados y resumidos mediante varias herramientas: histogramas de frecuencia, nubes de palabras, encuestas, clusterización de resultados, entre otras (véase el gráfico 2.4).

Gráfico 2.4: Herramientas utilizadas para resumir y analizar los resultados de los talleres sectoriales



Fuente: Elaboración propia.

A través de estos análisis se ha buscado responder principalmente a las siguientes interrogantes, que recogen las preocupaciones de los actores de los talleres:

- Inventario de factores y rangos de variación que se deben considerar en cada dimensión de la matriz DAMI.

- Identificación de espacios de alta precisión y alta ambigüedad informados por los asistentes.
- Mensajes fuerza.
- Requerimientos transmitidos de alta complejidad.

A continuación, se resumen las conclusiones de cada sesión sectorial.

Energía

El sector energía es el más amplio y diverso respecto de su caracterización, como consecuencia de su condición de insumo fundamental para la economía y la sociedad. Sus subsectores del marco de análisis, como el transporte, la industria y la minería, ejercen su mayor impacto a través de las cantidades y los tipos de energía que utilizan.

Desde un punto de vista de síntesis general, la mirada prevalente recogida en el taller de energía tiene como foco variables económicas y seguridad energética con acciones orientadas a mercados, promoción de energías limpias y estándares de eficiencia energética. En cuanto a las incertidumbres, se destacan los costos relativos de las opciones tecnológicas, los efectos del cambio climático en la hidrología futura, el retiro de centrales de carbón y la introducción del hidrógeno como alternativa viable.

Transporte

Una mirada análoga a la de energía se ha recogido en el taller de transporte (incluido el transporte privado, el transporte público y el de carga), con los siguientes ejes destacados: económico, demanda, modos de transporte, electrificación e hidrógeno. Respecto de las incertidumbres, destacan los costos relativos entre tecnologías y crecimiento de la demanda de transporte.

De manera complementaria, en transporte y energía se han reunido recomendaciones sobre modelos y fuentes de datos que se resumen en la aplicación de herramientas conocidas en el ámbito nacional, actualmente en uso tanto en el ámbito gubernamental como académico.

Industria y minería

En consonancia con la mayoría de los procesos participativos de la última década, en el taller de industria

y minería se observó un fuerte énfasis en esta última, dada la importancia económica del sector. Sin embargo, también fue posible rescatar la visión del sector de procesos industriales y uso de productos (con una participación muy menor en las emisiones, frente a la minería) y la de la industria manufacturera. De esta forma, los temas relacionados con el impulso de la eficiencia energética y la integración de energías renovables en los procesos productivos se complementaron con acciones y métricas ligadas al consumo y al manejo de híbrido de fibra coaxial, electromovilidad y fomento del hidrógeno (ecológico), esto último seguramente influido por las iniciativas asociadas a la ley de eficiencia energética y al desarrollo de la industria del hidrógeno ecológico, entre otras. También se detectaron propuestas novedosas, como políticas de largo plazo de la industria y la minería, la economía circular, el uso de instrumentos de mercado, y el alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Bosques y biodiversidad

En el taller de bosques y biodiversidad gran parte de las observaciones de los expertos ha resaltado el rol central que debe cumplir este sector, que para 2050 debe hacer una contribución igual o mayor a la de todos los demás sectores juntos para alcanzar la carbono-neutralidad. En ese sentido, se destacó la necesidad de considerar que las superficies de uso forestal, tanto de bosque nativo como de plantaciones, constituyen el gran motor para la modelación de emisiones del sector. Esto se manifiesta principalmente en los indicadores de desempeño mencionados, y se mantiene en las acciones y las incertidumbres del sector, que apuntan por un lado a aumentar la matriz forestal, y por otro a tomar en cuenta la posible degradación y pérdida de bosques por factores climáticos y antrópicos. Esto se encuentra en línea con los compromisos adquiridos por el país a través de la NDC, por lo que este aspecto será el pilar central de la modelación del sector.

Agricultura y ganadería

En el taller de agricultura y ganadería las miradas sobre reducción de emisiones fueron variadas, principalmente por la amplitud de actividades del sector; sin embargo, surgieron elementos transversales, como cambios en las prácticas de los agricultores, con un foco en el cuidado de los suelos, lo cual permitirá encaminarse hacia una agricultura más resiliente (aportando además la adaptación). En términos de medidas concretas de reducción de emisiones se destacaron las asociadas a la ganadería y sus actividades, la aplicación de nitrógeno en suelos agrícolas, y un tercer componente de aumento de la capacidad de captura de carbono de suelos, aspectos fundamentales para modelar. Se considerarán incertidumbres en la demanda de alimentos a nivel internacional, o posibles cambios en la dieta que conduzcan a una alimentación con menor carga de productos de origen animal.

Residuos

En el taller de residuos, si bien se trataron temáticas tradicionalmente relacionadas con los residuos y sus emisiones de GEI, se pudo apreciar también un interés de parte de los participantes por contar con una visión más amplia del sector, que amplía el alcance a los residuos no orgánicos, por ejemplo. En este mismo sentido, las métricas de desempeño tratadas evidencian un interés no solo por concentrarse en las emisiones de GEI, sino por la cadena completa de gestión de los residuos. Por su parte, los escasos modelos desarrollados evidencian que existe un amplio espacio de trabajo para el análisis, que permite no solo evaluar diferentes acciones de reducción de emisiones GEI, sino también morigerar sus consecuencias económicas, sociales y en el resto de la cadena de gestión de los residuos. Se destaca que las incertidumbres con mayor número de menciones corresponden a la cantidad y composición de los residuos generados. Todas estas observaciones son consideradas en la propuesta de modelación, la cual se basa en la caracterización de las diferentes etapas de la cadena de gestión de los residuos, sus interacciones entre ellas y el desarrollo de escenarios que permitan explorar el efecto de las diferentes acciones en un amplio rango de futuros posibles.

2.3

Segunda ronda de talleres

En etapas más avanzadas del proyecto, se realizó una segunda ronda de talleres. Participaron 77 actores provenientes de los mismos sectores y ámbitos que en el primer caso. Durante los talleres se exhibieron los avances del análisis cuantitativo (por ejemplo, incertidumbres consideradas y resultados a nivel sectorial). Los participantes proveyeron retroalimentación en puntos como la validación de los modelos sectoriales usados por

las universidades y los rangos de incertidumbre considerados, así como sugerencias generales para mejorar las simulaciones. Estos insumos fueron incorporados en el trabajo de modelación, lo cual permitió actualizar los datos y modelos utilizados, incorporar nuevas incertidumbres y actualizar intervalos de incertidumbre, así como simular incertidumbres adicionales a las planteadas en la NDC.

The background of the page is a light grey surface covered with numerous colorful sticky notes in shades of yellow, orange, and green. A repeating pattern of small, white, stylized icons is overlaid on the background. These icons include a globe and a leaf, arranged in a grid-like fashion. The overall aesthetic is clean, modern, and suggests a focus on sustainability or global business.

3

Modelos sectoriales



Este capítulo describe los modelos desarrollados en el marco del presente proyecto. La sección 3.1 describe la estructura general de la herramienta. Las secciones 3.2 a 3.5 contienen el enfoque metodológico utilizado en concordancia con los sectores emisores identificados en el inventario de gases de efecto invernadero (GEI) de Chile (capítulo 2). Abarcan el enfoque general de modelación utilizado, los supuestos para caracterizar la estrategia de contribución determinada a nivel nacional (NDC) actualizados con la mejor información disponible a 2020, las principales incertidumbres identificadas durante el proceso participativo y cómo se caracterizaron.¹ Por último, se describe la estrategia NDC+ y las medidas adicionales que se rescataron del trabajo participativo. En la sección 3.6 se detalla el modelo macroeconómico utilizado para ver el impacto marginal de la implementación de la estrategia NDC+ por encima de la estrategia NDC.



¹ Se consideran solo las medidas de la NDC con mayor impacto en la reducción de emisiones y para las cuales se contó con datos que permitieran su simulación numérica de manera rigurosa. Medidas como generación distribuida residencial y comercial, nuevos MEPS de electrodomésticos, entre otras de menor impacto, no se incluyeron en los modelos.

3.1 Descripción general de la herramienta de simulación

Se desarrolló un modelo integrado de evaluación para realizar estimaciones cuantitativas de diferentes trayectorias de reducción de emisiones. La herramienta computacional delineada facilita la exploración de diferentes supuestos sobre el futuro para reflejar las preocupaciones de las partes interesadas y definir una estrategia robusta de descarbonización para Chile.

A los propósitos del presente trabajo, se ha contemplado el desarrollo de modelos sectoriales idóneos para caracterizar los motores, las mecánicas, los costos y los impactos asociados a las emisiones de GEI en Chile para el periodo 2019-50. Probablemente la principal diferencia con experiencias previas estriba en la existencia de una integración real entre los modelos sectoriales, a la cual se suma, además, el análisis que considera incertidumbre, lo cual a nivel nacional es una innovación.

El enfoque metodológico utilizado busca analizar el desempeño de distintas estrategias de reducción de emisiones en un futuro incierto, donde muchos elementos pueden diferir de lo planificado. Para este ejercicio se consideró una recreación actualizada con la mejor información disponible para 2020 de las políticas de reducción de emisiones examinadas en la NDC suscrita por Chile (Gobierno de Chile, 2020), las cuales se explican con mayor detalle en Palma et al. (2019).

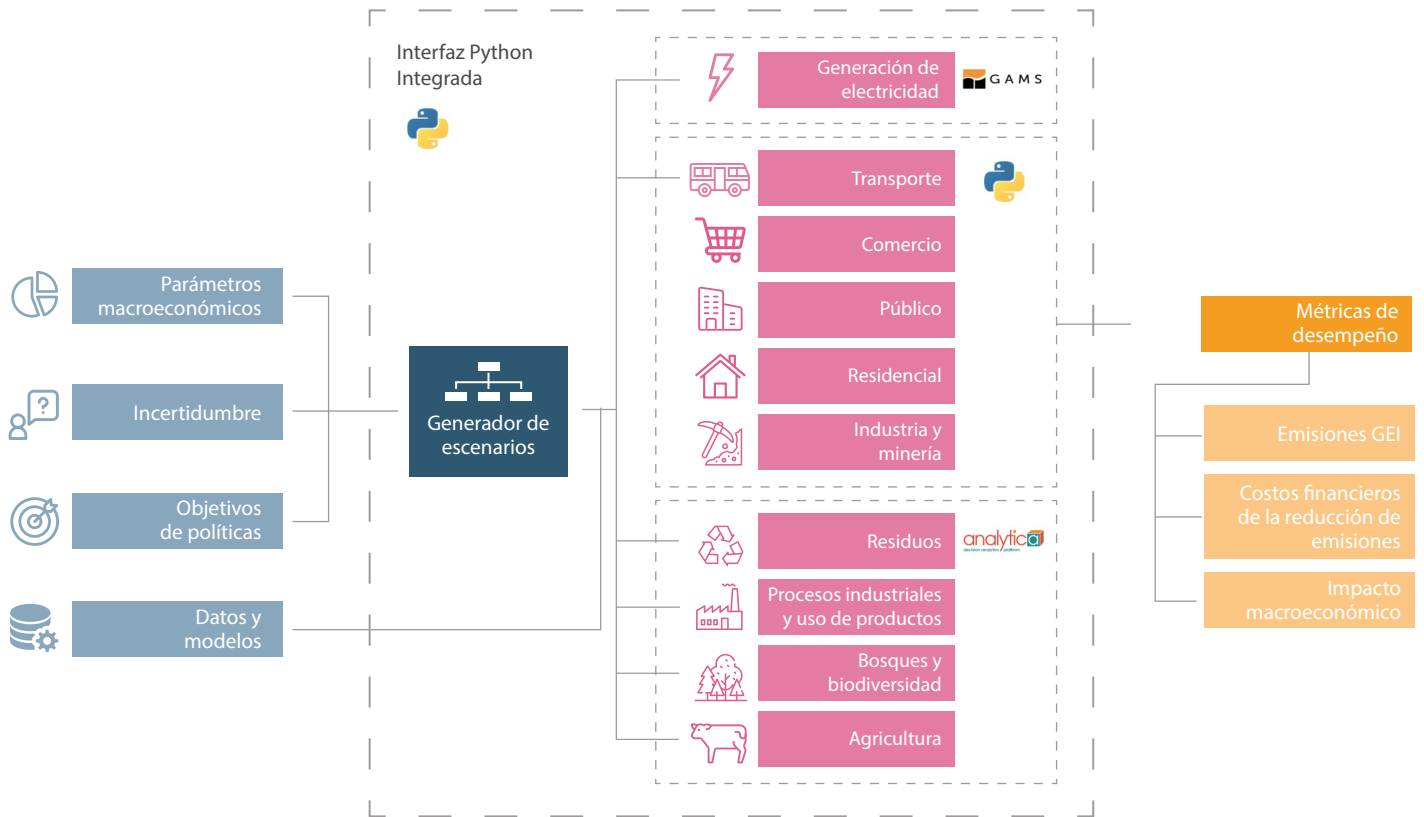
En este ejercicio, Chile alcanzaba la carbono-neutralidad para 2050, pero se analizó un solo futuro, y no fue posible realizar un análisis exhaustivo de sensibilidades a los parámetros utilizados. El primer paso es evaluar el desempeño de esta estrategia bajo otros futuros posibles

(por ejemplo, otras trayectorias de crecimiento, otra tasa de adopción de las medidas, etc.). En segundo lugar, se construyó una estrategia NDC+, que incluía otras medidas adicionales, por encima de las medidas de la NDC, que se rescataron del trabajo participativo. A criterio experto, esta estrategia NDC+ se evaluó bajo el mismo marco de análisis.

En el [gráfico 3.1](#) se muestra la estructura general de la herramienta computacional utilizada para proyectar los escenarios de descarbonización a nivel nacional. Durante el desarrollo del proyecto se implementaron modelos sectoriales para todos los sectores del inventario de GEI: generación eléctrica, transporte, comercio, público, residencial, industria y minería, residuos, procesos industriales, forestal y agricultura. Para el sector generación eléctrica se utilizó un modelo energético desarrollado con apoyo previo del Banco Mundial, el cual se basa en un enfoque de optimización (Centro de Energía, 2019). Para los sectores transporte, industria y minería, comercial y público, se implementaron modelos de proyección utilizando el lenguaje de programación Python. Para los sectores residuos, procesos industriales, forestal y agricultura, se empleó la plataforma computacional Analytica. Todos los modelos quedaron integrados en una plataforma computacional implementada en lenguaje de programación Python. La estructura de la misma fue desarrollada de tal forma de poder simular cientos y miles de escenarios a nivel nacional en tiempos de simulación acotados, de tal forma de poder aplicar el método de toma de decisiones robustas.

Gráfico 3.1:

Diagrama de la plataforma de modelación para el análisis de la Estrategia de Descarbonización de Largo Plazo



Fuente: Elaboración propia.

Los insumos de los que se alimenta la herramienta son: parámetros (producto interno bruto [PIB], población, precios de los energéticos, etc.), objetivos de políticas o medidas sectoriales (participación de electromovilidad, tasas de forestación, etc.), incertidumbres (definición aplicada sobre los parámetros y medidas para la reducción de emisiones) y datos (fuentes de información para construir elementos de la plataforma de modelación). Por su parte, estos insumos van a nutrir el generador de escenarios, el cual, por medio de un muestreo aleatorio de cada fuente de incertidumbre, crea una serie de futuros posibles, que alimentan cada modelo sectorial. Por último,

las salidas de la herramienta permiten conocer para cada futuro posible (se simularon cientos), el desempeño de las distintas estrategias de reducción de emisiones, el desempeño medido en términos de sus emisiones (especialmente en lo que respecta a alcanzar la carbono-neutralidad para 2050), y los costos incrementales de la reducción de emisiones. También se evalúa el impacto macroeconómico de estas estrategias, para lo cual se utilizó un modelo macroeconómico que se nutrió del costo asociado a la inversión en tecnologías (CAPEX) y el costo de operación y mantenimiento anual (OPEX) asociado con las medidas sectoriales.

3.2 Sector energía

Generación eléctrica

Las simulaciones del sector generación eléctrica se realizan utilizando el modelo energético de preparación para los mercados de carbono (PMR, por sus siglas en inglés, *partnership for market readiness*), una plataforma impulsada por el Banco Mundial que ayuda a los países a transitar hacia una economía menos contaminante. El modelo energético sectorial corresponde a un modelo de optimización cuya función objetivo minimiza el costo asociado al consumo de energía, el costo asociado a la inversión en tecnologías y el costo de operación y mantenimiento anual. El modelo de optimización determina el plan de expansión a mínimo costo que satisface la proyección de demanda eléctrica. El modelo está sujeto a un conjunto de restricciones, entre ellas: balance nodal entre generación y demanda, cotas máximas de producción para cada central en función de la disponibilidad del recurso renovable, potencia mínima, potencias máximas factibles de instalar en cada año y restricción de inercia mínima. La proyección de emisiones de GEI se realiza a partir de la proyección de generación eléctrica de las centrales termoeléctricas (carbón, gas natural, diésel y petróleo combustible) y los factores de emisión del INGEI.

Para caracterizar las proyecciones realizadas en el NDC, se toman en cuenta los siguientes supuestos:

• Costo de inversión:²

Se considera la proyección de costos de inversión de la Planificación Energética de Largo Plazo correspondiente al

escenario de tendencia baja (Escenario E en Ministerio de Energía, 2020).

• Precio de los energéticos:

Se considera la proyección de los precios de los energéticos de la Planificación Energética de Largo Plazo correspondiente al escenario de tendencia alta (Escenario E).

• Demanda eléctrica:

Proviene de la proyección estimada por los modelos de industria y minería, transporte, comercial, público y residencial. Los modelos sectoriales se estimaron de manera de obtener una demanda eléctrica similar a la proyectada en el Escenario E de la Planificación Energética de Largo Plazo.

• Hidrología:

La proyección del escenario NDC se realizó considerando una hidrología ponderada: 40% seca, 30% media y 30% húmeda.

La medida modelada en el escenario NDC corresponde al retiro de las centrales de carbón, considerando las fechas correspondientes al Escenario E de la Planificación Energética de Largo Plazo, que implican el total retiro hacia 2038. Adicionalmente, en el escenario NDC+ se considera un adelantamiento del retiro de las centrales de carbón hacia 2030 y un retiro de las centrales de gas natural hacia fines de 2050 (se supone una capacidad de 890 MW en centrales de gas natural disponible en 2050).

Cuadro 3.1: Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector generación eléctrica

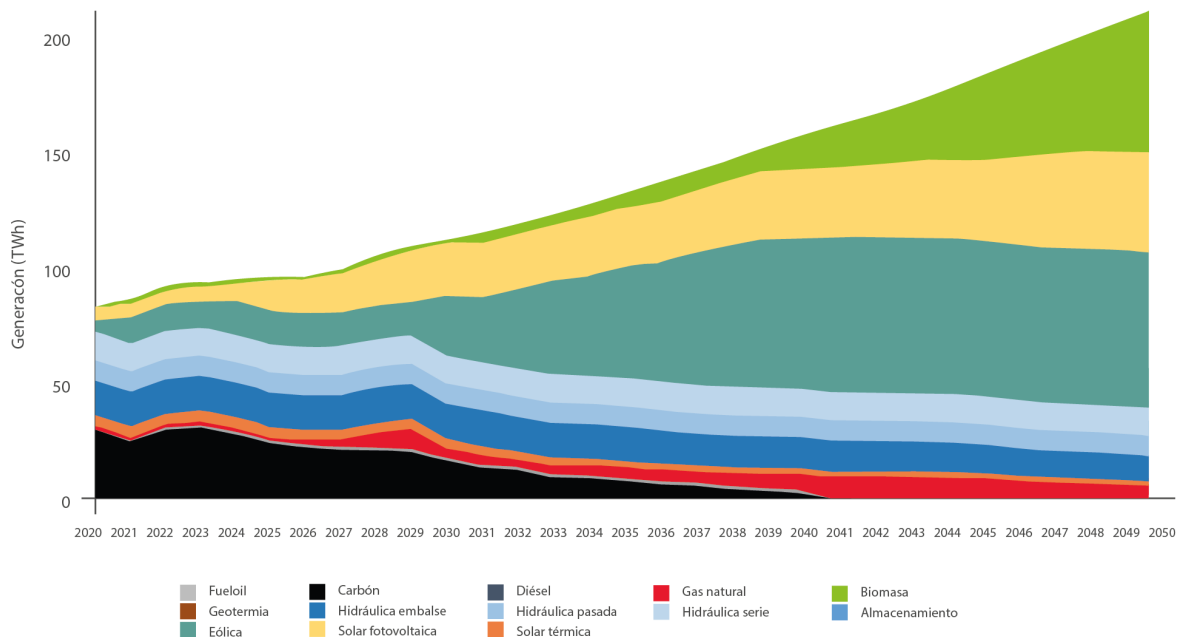
| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Demanda eléctrica | Se consideran distintos escenarios de proyección de demanda eléctrica tomando en cuenta la incertidumbre asociada a los modelos sectoriales. |
| Costo de inversión de tecnologías | Se proyectaron distintos escenarios de costos de inversión, que varían entre el escenario máximo y mínimo de los costos de la Planificación Energética de Largo Plazo. |
| Precio de los energéticos | Se proyectaron distintos escenarios de precio de los energéticos, que varían entre el escenario máximo y mínimo de los precios de los energéticos de la Planificación Energética de Largo Plazo. |
| Hidrología | Se consideraron distintas condiciones hidrológicas, que varían entre una condición seca y una húmeda. |

Fuente: Elaboración propia.

² Para cada precio de los energéticos existen 3 proyecciones: baja, media y alta. Asimismo, para los costos de inversión de las ERNC existen 3 proyecciones: baja, media y alta. El Escenario E de la PELP utiliza el escenario de costos altos de los precios de los energéticos y costos de inversión bajo de las ERNC, lo cual corresponde a un escenario favorable para el desarrollo de las fuentes ERNC.

El gráfico 3.2 muestra la proyección de generación eléctrica para el caso NDC.

Gráfico 3.2:
Proyección de matriz de generación eléctrica



Fuente: Elaboración propia.

Transporte

La proyección de demanda de este sector es impulsada por el crecimiento de la demanda de transporte de pasajeros, caracterizada por la variable PKM (pasajero-kilómetro), y la demanda del transporte de carga, caracterizada por la variable TKM (tonelada-kilómetro).³ Las proyecciones de demanda de energía y emisiones se realizan a partir de la caracterización de los distintos modos de transporte: transporte terrestre privado (“automóviles”), taxis, buses, camiones de carga, transporte ferroviario de pasajeros, transporte ferroviario de carga, aviación, transporte marítimo. Las emisiones de GEI se estiman a partir de la proyección de demanda por tipo de energético (gasolina, diésel, etc.) y los factores de emisión del INGEI. El modelo tiene una resolución espacial a nivel nacional y una resolución temporal anual. Los parámetros del modelo fueron calibrados de manera de replicar los datos del Balance Nacional de Energía del año 2017.

Los principales supuestos del NDC utilizados para la proyección del sector transporte fueron los siguientes:

• Producto interno bruto (PIB):

Se considera la proyección del PIB del informe NDC (Gobierno de Chile, 2020). Posteriormente, la proyección se actualiza tomando en cuenta el impacto de la crisis sanitaria.

• Población:

Se considera la proyección del PIB del informe NDC (Gobierno de Chile, 2020). Posteriormente, la proyección de población se actualiza considerando nuevos antecedentes disponibles.

³ La demanda de transporte se determina de manera exógena. Sin embargo, potenciales cambios en la demanda de transporte derivados de un mayor uso del transporte público, un mayor uso de la bicicleta y del teletrabajo se abordan en el capítulo 4.

Las medidas modeladas para caracterizar el escenario NDC fueron las siguientes:

• Electromovilidad en vehículos particulares (y comerciales):

Un 58% de participación de vehículos eléctricos puros e híbridos en 2050.

• Electromovilidad en taxis y colectivos:

Un 100% de participación de vehículos eléctricos para 2040 y 2050.

• Electromovilidad en buses:

Un 100% de participación de buses eléctricos para 2040.

• Hidrógeno en transporte de carga:

Un 85% de participación de camiones a hidrógeno para 2050.

• Hidrógeno en aviación:

Un 10% en el sector hacia 2050.

Adicionalmente, en el escenario NDC+ se incluyeron las siguientes medidas:⁴

• Aumento de la participación del transporte público:

Se considera un cambio de la participación modal del 10% desde el transporte privado hacia el transporte de buses para 2050.

• Aumento de la participación del transporte no motorizado:

Se considera un cambio de la participación modal del 10% desde el transporte privado hacia bicicletas para 2050.

• Aumento de la participación del teletrabajo:

Se considera una participación del teletrabajo del 10% hacia 2050, como consecuencia de lo cual se supone una disminución del transporte privado.

Las principales fuentes de incertidumbre modeladas se muestran en el [cuadro 3.2](#).

Cuadro 3.2:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector transporte

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PIB | Se consideran distintos escenarios de proyección del PIB, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo. |
| Población | Se consideran distintos escenarios de proyección de la población, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo. |
| Rendimiento de vehículos por tecnología | Se considera rango de variación del rendimiento de entre -10% y +10% con respecto al rendimiento de referencia. |
| Tasa de carga | Se considera un rango de variación del rendimiento de entre -10% y +10% con respecto a la tasa de carga de referencia. |
| Saturación de PKM del transporte aéreo | Se considera un rango de saturación de los PKM del transporte, que varía entre 4.5154.741 (valor de saturación del NDC) y 5.4185.690 PKM hacia 2050. El nivel de saturación de los PKM del sector aéreo se seleccionó en función del nivel de emisiones que proyecta el NDC. |

Fuente: Elaboración propia.

⁴ Las medidas de cambio de participación modal pueden tener impactos en más de un modo de transporte. Sin embargo, en este estudio, de manera conservadora, solo se evaluó el impacto de disminuir el transporte privado de personas. Las adiciones de otros canales de impacto en general contribuirían a una mayor reducción de emisiones.

Por su parte, las principales fuentes de incertidumbre asociadas a las medidas de reducción de emisiones se consignan en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3:
Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en transporte

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Participación de electromovilidad en vehículos particulares y comerciales | Se considera un rango participación de la electromovilidad que varía entre el 20% y el 70% para 2050. El 20% corresponde al valor utilizado en el Escenario Base del NDC. |
| Participación de hidrógeno en transporte de carga | Se considera un rango participación de la electromovilidad que varía entre un 50% y un 85% para 2050. El 50% corresponde al valor utilizado en el estudio del Ministerio de Obras Públicas financiado por el BID. |

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de los costos se utilizaron los siguientes modelos:

$$OPEX_t = \sum_{u,j} D_{u,j,t} \times Pr_{j,t}$$

$$CAPEX_t = \sum_{u,j} \Delta P_{u,j,t} \times CI_{u,j,t}$$

$$P_{u,j,t} = D_{u,j,t} / N_{u,j}$$

Donde OPEX corresponde a los costos de operación asociados al consumo de energía, $CAPEX_t$ es el costo de inversión anual en las tecnologías asociadas a los distintos usos finales. La variable $D_{u,j,t}$ corresponde a la demanda final de energía para cada uso final u , $Pr_{j,t}$ es el precio de los energéticos (expresado en US\$/Tcal),⁵ $P_{u,j,t}$ es la capacidad instalada en cada proceso, $\Delta P_{u,j,t}$ es el incremento de capacidad anual (el incremento anual es lo que se utiliza para la valorización del costo de inversión), $CI_{u,j,t}$ es el costo de inversión de cada tecnología (expresado en US\$/kW o US\$/vehículo) y $N_{u,j}$ es el nivel de actividad de cada proceso.

El modelo de costos es el mismo para todos los sectores energéticos (generación eléctrica, transporte, residencial, industria y minería), donde lo único que cambia son la representación de los usos finales, los niveles de actividad de cada proceso y las unidades en que se expresan los costos de inversión. En el caso de transporte, los usos finales están asociados a los vehículos particulares, camiones, etc., el nivel de actividad se expresa en km

recorridos y el costo de inversión, en US\$/vehículo. En el caso del sector residencial, los usos finales están asociados a calefacción, cocción, etc., los niveles de actividad están asociados a las horas de uso promedio de los artefactos de cada uso final y los costos de inversión (calefactores, cocinas, etc.) se expresan en US\$/kW. En industria y minería, los usos finales están asociados a usos de calor, motrices y otros usos eléctricos, los niveles de actividad están asociados a las horas de uso promedio de cada artefacto de cada uso final y los costos de inversión (calderas, motores, etc.,) se expresan en US\$/kW. Los precios de los energéticos, los costos de inversión y los niveles de actividad se obtuvieron del informe NDC (Gobierno de Chile, 2020). Para aquellos energéticos y usos finales cuyos datos no estaban disponibles en el informe, se utilizaron valores de fuentes de información alternativas.

Residencial

La proyección de demanda de energía del sector residencial usa la vivienda como la variable clave para determinar la evolución del sector. La metodología proyecta en una primera etapa la cantidad de viviendas y, luego, a partir de estimaciones de consumo unitario de energía por uso final y participación de las distintas tecnologías, se proyecta la demanda de energía. Se consideran los siguientes usos finales: calefacción, agua caliente sanitaria, cocción y otros artefactos eléctricos. Las emisiones de GEI se calculan a partir de la demanda de energía y los factores de emisiones del INGEI.

⁵ Se utilizan parámetros de conversión para transformar los precios de los energéticos expresados en unidades físicas (por ejemplo, US\$/ton, US\$/m3, etc.) a unidades de US\$/Tcal.

Los principales supuestos del NDC utilizados para la proyección del sector residencial fueron los siguientes:

• Población:

Se considera la proyección de población del informe NDC. Posteriormente, la proyección de población se actualiza considerando nuevos antecedentes disponibles.

• Proyección de número de viviendas:

Se considera la proyección de viviendas utilizada en el informe NDC.⁶

• Tasa de ocupación:

Se calcula a partir de la proyección de población y número de viviendas.

• Intensidad energética:

Se estiman las intensidades por uso final a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

• Participación por tipo de energético (o tecnología):

Se estiman las participaciones por tipo de energético a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

Las medidas modeladas para caracterizar el NDC fueron las siguientes:

• Calefacción eléctrica residencial:

Un 56% de casas para 2050 y un 70% de departamentos para 2050.

• Electrificación para cocción:

Un 36% de casas para 2050 y un 35% de departamentos para 2050.

• Sistemas solares térmicos:

Un 52% de agua caliente sanitaria en casas para 2050 y un 57% de agua caliente sanitaria en departamentos para 2050.

• Incremento en reacondicionamiento térmico de viviendas:

Entre 570.000 y 650.000 casas para 2050.

Adicionalmente, en el escenario NDC+ se incluyó la siguiente medida:

• Incremento del número de viviendas con reacondicionamiento térmico.

Las principales fuentes de incertidumbre modeladas se muestran en el [cuadro 3.4](#).

Cuadro 3.4:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector residencial

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Población | Se consideran distintos escenarios de proyección, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo. |
| Tasa de ocupación | Se disminuye la tasa de ocupación hasta un 20% menos que en el escenario de referencia. Solo se considera una variación negativa, la cual corresponde a una subestimación del número de viviendas de 2017 con respecto a los resultados del censo de ese año. |
| Intensidades de uso final | Se considera un rango de variación de la intensidad de entre -10% y +10% con respecto a la intensidad de referencia estimada a partir de los resultados del NDC. |

Fuente: Elaboración propia.

⁶ El censo de 2017 provee datos más recientes que los que usa el informe NDC, pero se guardaron los datos del informe NDC para usar la misma base de supuestos.

Las principales fuentes de incertidumbre asociadas a las medidas de reducción de emisiones en el sector residencial se muestran en el [cuadro 3.5](#). También se exploró la posibilidad de introducir incertidumbre en la medida de la calefacción eléctrica. Sin embargo, se observa que esta medida está reemplazando

principalmente leña, por lo que al explorar escenarios de menor participación de electrificación se debería observar un aumento de la participación de leña, lo cual no tendría un impacto significativo en la variación de emisiones de GEI de este sector.

Cuadro 3.5:

Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en el sector residencial

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Participación de los sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria | Se considera un rango de participación del número de viviendas con sistemas solares térmicos que varía entre un 30% y un 80% para 2050. La cota superior (80%) está asociada a las nuevas medidas incluidas en el escenario NDC+. |
| Número de viviendas con reacondicionamiento térmico | Se considera un rango de número de viviendas que realizan reacondicionamiento térmico que varía entre 1 millón y 6,1 millones de viviendas. La cota superior (6,1 millones) está asociada a las nuevas medidas incluidas en escenario NDC+. |

Fuente: Elaboración propia.

Industria y minería

Para la proyección de demanda de energía, se caracterizan los distintos subsectores del Balance Nacional de Energía: cobre, minas varias, hierro, azúcar, cemento, papel y celulosa, pesca, petroquímica, siderurgia e industrias varias. El consumo energético es impulsado principalmente por las producciones industriales asociadas a cada subsector. La demanda de cada uno se desagrega en tres usos finales: motrices, térmicos y otros consumos eléctricos, para representar los principales procesos demandantes de energía. Con esta desagregación, y con datos de eficiencias por energéticos, se calcula la energía útil de la industria que corresponde a la fracción de la energía demandada que se transforma en la energía necesaria para producir una unidad del bien. La desagregación en usos finales se realiza con información de los modelos sectoriales proporcionada por el Ministerio de Energía.

Los principales supuestos del NDC utilizados para la proyección del sector industria y minería fueron los siguientes:

• PIB:

Se considera proyección de PIB del informe NDC (Gobierno de Chile, 2020). Posteriormente la proyección se actualiza tomando en cuenta el impacto de la crisis sanitaria.

• Proyección de producción de cobre, hierro, minas varias, papel y celulosa:

Se consideran proyecciones empleadas en el NDC. Para los primeros años, se ajustan las producciones industriales de acuerdo con los datos reales.

• Intensidad energética:

Se estiman las intensidades por uso final a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

• Participación por tipo de energético (o tecnología):

Se estiman las participaciones por tipo de energético a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

• Intensidad energética:

Se estiman las intensidades por uso final a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

• Participación por tipo de energético (o tecnología):

Se estiman las participaciones por tipo de energético a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

Las medidas modeladas para caracterizar el NDC fueron las siguientes:

• Sistemas solares térmicos:

Un 33%⁷ en industrias varias, un 16% en minería del cobre para 2050.

• Hidrógeno-usos en procesos térmicos:

Un 3% en industrias varias.

Hidrógeno-usos motrices:

Un 37% para minería rajo abierto, un 8% para minería subterránea, un 12% para industrias varias, un 21% en minas varias para 2050.

• Biomasa:

Un 10% de aumento en biomasa utilizada para la generación de electricidad, medida considerada en modelos de expansión de la matriz eléctrica.

• Electrificación de usos motrices:

Un 88% en industrias varias, un 74% en minas varias para 2050.

• Electrificación de usos del cobre:

Un 57% en uso final rajo abierto.

Adicionalmente, en el escenario NDC+ se incluyeron las siguientes medidas:

- Incremento de la participación sistemas solares térmicos en minería del cobre.
- Introducción de hidrógeno en los procesos térmicos del subsector siderurgia.

Las principales fuentes de incertidumbre modeladas en industria y minería se exhiben en el [cuadro 3.6](#).

Cuadro 3.6:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector industria y minería

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Producción de PIB | Se consideran distintos escenarios de proyección, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo. La proyección del subsector “industrias varias” está correlacionado con el PIB. |
| Producción de cobre | Se considera rango de producción máxima y mínima, de acuerdo con proyecciones de producción de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) hasta 2030 y supuestos de participación de Chile en la producción mundial hacia 2050. |
| Producción de minas varias | Se considera un rango de variación de -70% respecto del valor de referencia (valor NDC). El rango inferior se obtuvo de un estudio previo. |
| Producción de hierro | Se considera un rango de variación de -40% y +40% con respecto al valor de referencia. |
| Producción de papel y celulosa | Se considera un rango de variación de +23% con respecto al valor de referencia. El rango superior está asociado a la entrada en operación del proyecto MAPA. |
| Intensidad del sector cobre | Se considera un rango de variación de -10% y +70% con respecto al valor de referencia. El rango de variación máximo se estima a partir de escenarios de proyección pesimista de la evaluación de las leyes de los minerales. |
| Intensidades de uso final | Se considera un rango de variación de la intensidad de entre -10% y +10% con respecto a la intensidad de referencia estimada a partir de los resultados del NDC. |
| Elasticidad demanda/PIB | Para el caso particular del sector industrias varias, se considera una sensibilidad con respecto a la elasticidad demanda/PIB de este sector. Se considera un rango de variación de la intensidad de entre -10% y +5% con respecto a la intensidad de referencia estimada a partir de los resultados del NDC. El valor más bajo se deriva de estimaciones realizadas en estudios previos, donde se muestra que la demanda de este sector crece a una tasa inferior a la tasa de crecimiento del PIB. |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para producción del cobre y producción de minas varias, se utilizó la metodología propuesta en Centro de Energía (2020).

⁷ Valor estimado a partir de las salidas de los modelos proporcionados por el Ministerio de Energía, pero que es distinto del valor que aparece en el informe NDC. Derivado de lo anterior, nuestras estimaciones pueden diferir ligeramente de las estimaciones originales plasmadas en los documentos de la NDC.

Las principales fuentes de incertidumbre asociadas a las medidas de reducción de emisiones en industria y minería se reflejan en el [cuadro 3.7](#).

Cuadro 3.7:
Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en industria y minería

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Participación de los sistemas solares térmicos | Se considera un rango participación de que varía entre un 8% y un 46% en industrias varias, y un 8% y un 30% en minería del cobre. Se seleccionan estos subsectores por ser los que mayormente contribuyen a las emisiones del sector industria y minería. La cota superior de estas medidas está asociada a las nuevas medidas incluidas en el escenario NDC+. |
| Electrificación de usos de cobre a rajo abierto | Se disminuye la participación de electricidad hasta un rango del 27%, lo cual se explica por la dificultad de electrificar los camiones CAEX utilizados en este proceso de la minería. En efecto, actualmente las únicas medidas en que se cuenta con algunos pilotos de prueba consisten en el uso de hidrógeno. La electrificación se podría interpretar como el uso de celda de hidrógeno, pero en el caso del NDC esto corresponde a otra medida. |
| Hidrógeno en procesos térmicos | Se varía la partición de hidrógeno entre un 0% y un 10% en siderurgia. La cota superior (10%) está asociada a las nuevas medidas incluidas en el escenario NDC+. |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: En el caso de la partición de hidrógeno, se trata de la medida adicional que se podría implementar de acuerdo con Holappa (2020).

Residencial

La proyección de demanda de este sector se realiza utilizando un modelo econométrico que relaciona el crecimiento de la demanda con el crecimiento del PIB a través de la siguiente expresión: $D_t = D_{t-1} \times (1 + r_{pib_t} \times e_t)$. Donde D es la demanda total de energía en el año t , r_{pib_t} es la tasa de crecimiento del PIB y e_t es la elasticidad demanda/PIB. Luego la demanda D_t se transforma en demanda útil mediante la siguiente expresión: $DU_t = D_t \times R$, donde DU_t es la energía útil y R es la razón entre demanda final y demanda útil. Posteriormente, la demanda útil se desagrega en los siguientes usos finales: calefacción, agua caliente sanitaria, motriz y otros usos. En la categoría "otros usos" se incluye gran parte de la demanda que no tiene una caracterización de uso final (por falta de información). Finalmente, la demanda de cada uso final se desagrega en los distintos tipos de energéticos (gas natural, diésel, electricidad, etc.). Las emisiones de GEI se estiman a partir de la proyección de demanda por tipo de energético (gasolina, diésel, etc.) y los factores de emisión del INGEI. El modelo tiene una resolución espacial a nivel nacional y resolución temporal anual.

Los principales supuestos del NDC utilizados para la proyección del sector comercial fueron los siguientes:

- **PIB:**
Se considera proyección de PIB del informe NDC. Posteriormente, la proyección se actualiza tomando en cuenta el impacto de la crisis sanitaria.
- **Elasticidad demanda/PIB (e_t):**
La elasticidad se estima a partir de los datos de salida de los modelos energéticos proporcionados por el Ministerio de Energía.
- **Participación por uso final y tipo de energético:**
Se estiman las participaciones por uso final y tipo de energético a partir de los datos de proyección de demanda de energía proporcionados por el Ministerio de Energía.

Las medidas modeladas en el sector comercial para caracterizar el NDC fueron las siguientes:

- **Electrificación de usos finales:**⁸
Se alcanza una electrificación del 70% de los usos finales.

Las principales fuentes de incertidumbre modeladas en el sector comercial se muestran en el [cuadro 3.8](#).

⁸ Debido a limitaciones de información con respecto a los usos finales del sector comercial. Se asume que se reemplaza el diésel hasta alcanzar un 70% de participación de electrificación para 2050.

Cuadro 3.8:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector comercial

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PIB | Se consideran distintos escenarios de proyección de PIB, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo. |
| Elasticidad demanda/PIB | Se considera un incremento de la elasticidad demanda/PIB de hasta un 20% con respecto al valor de referencia. El incremento se explica porque la elasticidad estimada por el consultor es mayor que la utilizada en el NDC. |

Fuente: Elaboración propia.

Público

Debido a la baja participación en demanda de energía y emisiones, la proyección de demanda de este sector se realiza utilizando un modelo simplificado que correlaciona el crecimiento del sector con el de la población. Se emplea la siguiente expresión: $D_t = I \times P_t$, donde D_t es la demanda de energía, P_t es la población e I es la intensidad energética.

Los principales supuestos del NDC utilizados para la proyección del sector público han sido los siguientes:

• Población:

Se considera la proyección de PIB del informe NDC. Posteriormente, la proyección de población se actualiza considerando nuevos antecedentes disponibles.

Para este sector no se incluyeron medidas de reducción de emisiones.

3.3 Sector de procesos industriales y uso de productos

Generación eléctrica

La modelación de las emisiones del sector de procesos industriales y uso de productos se implementó en el *software* de modelación Analytica. El modelo considera las categorías de emisiones y la metodología de contabilización del INGEI nacional, que se basa en las directrices metodológicas del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2006).

El modelo está compuesto por seis categorías. Las principales en términos de emisiones corresponden a los productos alternativos para las sustancias agotadoras del ozono, la industria mineral y la industria metálica. El modelo desarrollado se basa en el modelo prospectivo de emisiones del Ministerio del Ambiente, salvo para la categoría de uso de productos alternativos para las sustancias agotadoras del ozono, para la cual se diseñó e

implementó una nueva metodología que considera las restricciones impuestas por la Enmienda de Kigali del Protocolo de Montreal bajo una lógica económica.

La proyección de los niveles de actividad se da a partir de relaciones econométricas observadas en la serie temporal 1990-2016, las cuales –salvo para algunas subcategorías de los productos alternativos a las sustancias agotadoras del ozono– dependen de tendencias históricas y del PIB. En el caso de subcategorías puntuales como refrigeración doméstica y aire acondicionado vehicular, se incorpora la población como motor del consumo. De forma adicional, en el caso particular del cemento, se consideró el consumo de esta mezcla mineral que ingresa como una variable incierta en la estimación de emisiones del sector industria y minería.

En el escenario de políticas actuales, es decir, bajo los supuestos de las medidas para alcanzar la carbono - neutralidad, no se evalúan medidas nuevas. Sin embargo, sí se modela el efecto de la Enmienda de Kigali en el consumo y las posteriores emisiones de híbrido de fibra coaxial. Dicha modelación cuenta con cinco pasos:

1. Modelación del consumo sin Enmienda de Kigali:

A partir de relaciones econométricas entre la expansión de los bancos de híbrido de fibra coaxial y variables como PIB y población, se estima la proyección del consumo en un escenario sin Enmienda de Kigali.

2. Determinación de los límites de consumo:

Kigali establece un cronograma de reducción del consumo que se determina a partir del consumo de 2020 a 2022, más un margen que permite que los primeros años se sigan sustituyendo las sustancias agotadoras del ozono por híbrido de fibra coaxial (Höglund-Isaksson et al., 2017).

Aun así, establece un congelamiento del consumo para 2024 a 2028, y una reducción del 10% en 2029, del 30% en 2035, del 50% en 2040 y del 80% en 2045.

3. Determinación del nuevo consumo:

El nuevo consumo se determina forzando el cumplimiento de los límites de consumo. Para ello, se priorizan las diferentes aplicaciones de híbrido de fibra coaxial según los costos de sustitución tecnológica obtenidos de los estudios de Purohit y Höglund-Isaksson (2017) y Höglund-Isaksson et al., (2017). Esta priorización significa que cuando el consumo sin Enmienda de Kigali supera el límite, las aplicaciones con menores costos de sustitución

tecnológica detienen su consumo destinado a expandir su banco, incluyendo tantas aplicaciones como sean necesarias para cumplir con el límite de consumo.

4. Determinación de los nuevos bancos de aplicaciones:

A partir del nuevo consumo, y considerando las mismas tasas de fuga y vida útil promedio que se toman en cuenta en la estimación del INGEI, se realiza la nueva estimación del banco de forma recursiva, donde el banco en un año t (B_t), depende del banco del año anterior (B_{t-1}), del nuevo banco (N_t) y de la fracción del banco que termina su vida útil (N_{t-vu}), para cada aplicación:

$$B_t = B_{t-1} + N_t - N_{t-vu}$$

5. Determinación de las emisiones del sector:

A partir del nuevo banco estimado, se estiman las emisiones de híbrido de fibra coaxial. En particular, se consideran las emisiones producto de las fugas, de fin de vida útil, de instalación de nuevos bancos y de contenedores.

En el escenario de NDC+, es decir, el que incluye acciones de descarbonización adicionales propuestas a partir de los insumos de las partes interesadas, se evalúa una medida adicional:

Nuevas plantas de recuperación y regeneración de refrigerantes:

Instalación progresiva entre 2025 y 2031 hasta la capacidad máxima de 2.800 t HFC/año.

Cuadro 3.9:

Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector de procesos industriales y uso de productos

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Niveles de actividad | Esta incertidumbre se incorpora de manera indirecta y depende principalmente del PIB y de tendencias históricas, por medio de relaciones econométricas. |
| Producción de cemento | Varía de la misma forma en que varía en el sector industria y minería. |
| Importación de clínker | Se considera que la fracción de clínker importada varía entre un 30% y un 60%. |
| Tasa de fugas de refrigerante en el sector comercial e industrial | Se considera que las tasas de fugas futuras de ambas aplicaciones varían en +/-5% respecto del valor central correspondiente a la tasa de emisión considerada en el INGEI. El rango para el sector comercial sería de un 30% a un 40% y en el sector industrial, de un 15% a un 25%. |

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Sector residuos

La modelación de las emisiones del sector residuos o economía circular se implementó en el *software* Analytica. Este modelo corresponde a una versión corregida y actualizada del modelo desarrollado en el proceso de MAPS-Chile, y considera los mejores antecedentes a la fecha, provistos por el equipo del SNI-Chile. En la práctica, el modelo considera las categorías de emisiones y metodología de contabilización del INGEI nacional, que se basan en las directrices metodológicas del IPCC (2006). En el modelo hay cuatro categorías, y las principales en términos de emisiones corresponden a los residuos sólidos domiciliarios y las aguas domésticas.

Para la proyección de la generación de residuos, se consideran las proyecciones macroeconómicas de población y PIB, las cuales se emplean como motores para la proyección de las variables que describen el nivel de actividad de las diferentes categorías y subcategorías. En particular, para residuos urbanos se toman en cuenta las relaciones econométricas de Antosiewicz et al. (2020), quienes relacionan de forma cuadrática la generación de residuos per cápita con el logaritmo del PIB per cápita.

Respecto de la composición de los residuos, se considera que esta fluctúa linealmente de la composición considerada actualmente en el INGEI hacia la composición de países de ingreso medio-alto a 2030, y a la composición de países de ingreso alto para 2050. Estas composiciones se obtienen a partir de Antosiewicz et al. (2020). En cuanto al nivel de actividad de las aguas residuales domésticas, la generación total es indexada a la población, mientras que el contenido de proteínas es estimado como una función

del PIB. En lo que atañe al destino de los residuos y aguas residuales, solo se toman en cuenta las variaciones incluidas en el modelo prospectivo de emisiones del Ministerio del Medio Ambiente, que considera proyectos ya comprometidos.

En el escenario de políticas actuales, es decir, bajo los supuestos de las medidas para alcanzar la carbono-neutralidad, se evalúan dos medidas principales:

• Captura de biogás en rellenos sanitarios:

Considera la entrada en operación de forma progresiva entre 2025 y 2030 de sistemas de captura y quema de biogás en todos los rellenos sanitarios del país.

• Nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas:

Instalación de nuevas plantas en los principales centros urbanos del país, con suficiente capacidad para tratar las aguas servidas del Gran Concepción (2030), Gran Valparaíso (2035), Antofagasta (2040) y la conurbación La Serena-Coquimbo (2040).

En el escenario de NDC+, es decir, con inclusión de acciones de descarbonización adicionales propuestas a partir de los insumos de las partes interesadas, se evalúa una medida adicional en el sector residuos:

• Nuevas plantas de compostaje:

Instalación de plantas de compostaje en todas las regiones del país, con suficiente capacidad para compostar el 60% de los residuos orgánicos residenciales.

Cuadro 3.10:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector residuos

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables | Esta incertidumbre es incorporada de manera indirecta y depende de dos variables con incertidumbre y que impactan directamente en la estimación: población y PIB. La generación de residuos varía linealmente con la población, y con el cuadrado del logaritmo del PIB per cápita, de acuerdo con la relación observada por Antosiewicz et al. (2020). |
| Tasas de reciclaje | Se considera que la implementación de la Ley 20.920, que fomenta el reciclaje e instala esquemas de responsabilidad extendida del productor, tiene impacto sobre la cantidad de residuos que efectivamente se dispone en los sitios de eliminación final. Se considera un rango del 85% al 105% respecto de las metas establecidas para los productos prioritarios de envases y embalajes. |
| Elasticidad de la generación residuos industriales-PIB | Parámetro que describe la variación de residuos industriales generados respecto de la variación del PIB. Se considera un rango de 0 a 1. |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.11:

Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en el sector residuos

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eficiencia de captura de biogás | Se considera un valor medio del 45% de la captura de los sistemas de captura y quema, respecto del total de biogás generado en los rellenos sanitarios. Se considera un rango de incertidumbre de +/-10% respecto del valor central. |
| Costos de inversión | Si bien no tienen impacto directo sobre la proyección de las emisiones, los costos de inversión asociados a las acciones de reducción de emisiones se consideran inciertos. Para los sistemas de captura y quema se considera un rango de US\$0,45 millones y US\$1,1 millones por una capacidad de 1.300 m ³ /día. Para las plantas de tratamiento de aguas servidas, se considera un costo de inversión de US\$1,7 +/-20%/(m ³ /año). |

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Sector agricultura

En la modelación de las emisiones del sector agricultura (que también considera las emisiones asociadas a la ganadería) se utilizó el software Analytica de Lumina, considerando las categorías de emisiones y metodología de contabilización del INGEI nacional, que se basan en las directrices del IPCC (2006). El modelo considera cinco categorías principales de fuentes de emisión de GEI del sector, que corresponden a alrededor del 95% de las emisiones totales del mismo: fermentación entérica (emisiones de CH₄ producida en los sistemas digestivos de los animales), gestión del estiércol (emisiones de CH₄ y N₂O generadas por los sistemas de producción animal para el almacenamiento y la eliminación del estiércol), suelos agrícolas (emisiones de N₂O producidas por procesos microbianos en el suelo, asociados a la aplicación de compuestos nitrogenados) y aplicación de urea (emisiones de CO₂, producto de la aplicación de urea). Estas representan, respectivamente, el 39,7%, el 17,1%, el 38,0% y el 3,0% del total de emisiones del sector para 2016 (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

Para la proyección de ganado, se elaboró un modelo econométrico basado en el precio de la carne (para ganado bovino) y del maíz y la soya (para ganado bovino, porcino y aves de corral). Las proyecciones de precios fueron obtenidas de las estadísticas mundiales de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).⁹ Para la proyección del consumo de fertilizante sintético, se utilizó un modelo de intensidad de uso de fertilizantes

asociado al uso de suelos por tipos de cultivo, a través de regresión lineal múltiple. Se proyectó el uso de suelos para diferentes cultivos con un modelo autorregresivo para las principales categorías de cultivos.

En el escenario de políticas actuales, es decir, bajo los supuestos de las medidas para alcanzar la carbono-neutralidad (escenario NDC), se evalúan tres medidas principales:

• Cambio en la dieta bovina:

Esta medida considera un aumento progresivo del cambio en la dieta bovina (aditivos que disminuyen la fermentación entérica en un 9% en comparación con una dieta normal), hasta llegar al 70% de las vacas lecheras para 2050, tras iniciar la conversión en 2030.

• Biodigestores:

Esta medida aumenta progresivamente el destino de purines porcinos a biodigestores, llegando con un 70% de los purines (medidos en cabezas porcinas) para 2040, manteniéndose constante para 2050.

• Uso eficiente de fertilizantes:

Esta medida aumenta progresivamente el uso eficiente de fertilizantes llegando a una reducción del 30% de uso de fertilizantes proyectados para 2030 para ciertos cultivos, manteniéndose constante para 2050.

⁹ Véase <https://stats.oecd.org/>; se mantiene la proyección de precios 2019-28 para distintos productos. Para la proyección de dichos precios al futuro, se consideró la tasa de crecimiento en dicho periodo y se mantuvo constante hasta 2050.

A partir de los insumos de las partes interesadas que asistieron a los talleres participativos, se incluyen acciones de descarbonización adicionales (escenario de NDC+), de entre las cuales resaltan tres medidas:

• Reducción del consumo de carne de vacuno:

Disminución progresiva hasta alcanzar una reducción del 10% para 2050, partiendo de 2025. El consumo de carne bovina se va reemplazando por otros tipos de proteína (animal y vegetal). La medida tiene como supuesto que la disminución del consumo impacta solo en la producción nacional.

• Aplicación de enmiendas orgánicas en suelos:

Aumento de la captura de carbono en suelos, producto de

la aplicación de enmiendas orgánicas (guano de aves de corral) en tierras de cultivos anuales. Esto comenzaría en 2030, alcanzaría a un 10% de la superficie en 2040, y se mantendría constante hasta 2050. Se consideran las emisiones asociadas al contenido de nitrógeno.

• Manejo holístico del ganado:

Aumento de la captura de carbono en praderas, producto de un cambio en el manejo del ganado, que considera tiempos más cortos de pasturas por cuadrante, lo que permite un crecimiento de las raíces, y alimentos más nutritivos para el ganado. La medida inicia su aplicación en 2030 y llega a un 10% del ganado bovino en pasturas bajo manejo holístico para 2040, solamente en la Región de Los Lagos, manteniéndose constante para 2050.

Cuadro 3.12:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector agricultura

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Precio de la carne bovina | Se considera un rango de distribución de incertidumbre del precio de la carne bovina de +/-35% desde el valor de referencia a 2050. Este parámetro se utiliza para proyectar el ganado bovino, como principal motor, junto con el precio del maíz. |
| Precio de la soya | Se considera un rango de distribución de incertidumbre del precio de la soya de +/-45% desde el valor de referencia a 2050. Este parámetro se emplea para proyectar ganado de aves de corral, en conjunto con el precio del maíz. |
| Precio del maíz | Se considera un rango de distribución de incertidumbre del precio del maíz de +/-45% para 2050. Este parámetro se usa para proyectar el ganado bovino y porcino, así como aves de corral. |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.13:
Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en agricultura

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cambio de dieta bovina | Se considera un rango de incertidumbre mínimo de -50% y un máximo del 36% (es decir, sobrecumplimiento del supuesto de adopción), asociado al cumplimiento de la tasa de adopción de la medida. |
| Uso eficiente de fertilizantes | Se considera un rango de incertidumbre mínimo de -70% y, como rango máximo, se considera el valor máximo asumido como supuesto de tasa de adopción de la medida (es decir, no se espera un sobrecumplimiento de dicha medida). |
| Biodigestores porcinos | Se considera un rango de incertidumbre mínimo de -29% y un rango máximo del 36%, asociado al cumplimiento de la tasa de adopción de la medida. |
| Reducción del consumo de carne de vacuno | Se considera un rango de incertidumbre mínimo de -10% y un rango máximo de +10% (es decir, sobrecumplimiento del supuesto de consumo de carne), asociado al cumplimiento de la tasa de adopción de la medida. |
| Agricultura regenerativa: captura de carbono por aplicación de enmienda orgánica | Se considera un rango de incertidumbre mínimo de -10% y un rango máximo de +10%, asociado al cumplimiento de la tasa de adopción de la medida. |
| Manejo holístico del ganado | Se considera un rango de incertidumbre mínimo de -10% y rango máximo de +10%, asociado al cumplimiento de la tasa de adopción de la medida. |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Todos los valores fueron ajustados mediante el proceso participativo.

3.6 Sector de bosques y biodiversidad

Para el sector bosques y biodiversidad, que en el INGEI se conoce con el nombre de sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura, se elaboró un modelo sobre la base del *software* Analytica, que emula los resultados del INGEI nacional utilizando los resultados de emisiones del sector, metodologías de las Directrices del IPCC (2006) y valores de parámetros promedio y por defecto del Ministerio del Medio Ambiente (2018). El modelo se divide en distintos módulos anidados, que contienen la modelación específica de una categoría del sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura, y están organizados de la siguiente manera:

4.A Tierras forestales:

Tierras forestales que permanecen como tales: En este módulo se modelan las emisiones y capturas asociadas al aumento de biomasa, la pérdida de biomasa (cosecha, incendios, uso de leña y quema de residuos forestales), y cambio en la vegetación (sustitución y restitución).

Tierras convertidas a tierras forestales: En este módulo se incluyen las emisiones y capturas asociadas a tierras convertidas en bosque nativo y tierras convertidas en plantaciones.

4.X.1: Tierras convertidas en X (Donde X=B.C.D.E.F): En este módulo se agrupan las capturas y emisiones asociadas a tierras convertidas en pastizales (B), cultivos (C), humedales (D), asentamientos (E) y otras tierras (F).

4.X.2.X: Tierras X que permanecen como tales (Donde X=B.C.D.E.F): Aquí se consideran las capturas y emisiones asociadas a pastizales (B), cultivos (C), humedales (D), asentamientos (E) y otras tierras (F), que permanecen como tales.

Para la proyección del sector, se desarrolló un modelo de proyección agregada a nivel nacional utilizando vectores autorregresivos.¹⁰ Las categorías proyectadas son las siguientes:

- Bosque nativo y plantaciones.
- Tierras convertidas a bosque nativo y plantaciones.
- Tierras de cultivos y pastizales incendiados.
- Tierras convertidas en otras categorías de uso.

De esta forma, se proyectó el uso de suelo, para posteriormente utilizar las ecuaciones de las Directrices del IPCC de 2006 (IPCC, 2006) o factores de emisión por hectárea específicos para cada categoría INGEI, con la finalidad de determinar las emisiones futuras.

En el caso de incendios forestales, la proyección se realiza a partir de información histórica de superficie incendiada a nivel anual para bosques y plantaciones por separado. Para el ejercicio principal se consideró un valor de emisiones sobre la base del promedio anual histórico, que de hecho tiende a disminuir, producto de la implementación de un mayor control de los incendios, en concordancia con lo comprometido en la NDC.

Adicionalmente, de la superficie histórica anual incendiada se extraen percentiles a fin de determinar rangos de tamaños de incendios forestales para la ocurrencia anual. Este análisis da cuenta de la alta variabilidad para un año en particular, lo que podría implicar que para 2050 en particular no se alcanzará la carbono-neutralidad, debido a la ocurrencia de una temporada de incendios extrema. Para simular este riesgo, el modelo sectorial lo contempla independientemente, conceptualizándolo como un “megaincendio”. Al realizar un análisis de este riesgo, se puede ver que aproximadamente en uno de cada siete años (13,4%) ocurre una temporada de incendios alta que podría poner en riesgo la NDC.

Dentro del modelo, en el escenario NDC se consideran las siguientes acciones, asociadas al aumento de capturas del sector, y a la conservación de los bosques y la biodiversidad:

• Forestación:

Esta medida está orientada a incrementar la superficie forestal, y considera la forestación de 200.000 hectáreas para 2030, de las cuales 100.000 hectáreas corresponden a cubierta forestal permanente de bosque nativo, y las otras 100.000 hectáreas, a plantaciones forestales. Esta medida es parte de la NDC de Chile, y se denomina “Contribución en Integración-UTCUTS-Bosques No. 5 (I5)” (Gobierno de Chile, 2020).

¹⁰ El modelo de pronóstico de vectores autorregresivos es un modelo de estimación que puede usarse cuando dos o más series de tiempo se influyen entre sí, utilizando como predictores los valores de años anteriores en la serie de tiempo de cada uno de los componentes de los vectores para modelar el comportamiento de la serie. La proyección de cambios de la superficie actual de x en el tiempo t queda definida como la función del valor del año anterior (t-1) (rezago de un año) y considerando la superficie del año anterior de otras categorías ($k=2, k=3, \dots, k=n$).

• Aumento de la superficie de bosque nativo bajo plan de manejo:

Esta medida está orientada al manejo y la recuperación del bosque nativo, y busca incrementar la superficie manejada en 200.000 hectáreas para 2030. La medida forma parte de la NDC de Chile, y se denomina “Contribución en Integración-UTCUTS-Bosques No. 4 (I4)” (Gobierno de Chile, 2020).

• Disminución de la degradación de bosque nativo:

En esta medida se consideran tres elementos de degradación de bosque nativo, que van disminuyendo gradualmente hasta llegar a un 25% menos de pérdida de bosque nativo para 2030. Los procesos que propician esta reducción son: menor superficie de incendios forestales, sustitución de bosque nativo con plantaciones forestales, y traspaso de bosque nativo a otros usos de suelo no forestales. Esta medida es parte de la NDC de Chile, y se denomina “Contribución en Integración-UTCUTS-Bosques No. 6 (I6)” (Gobierno de Chile, 2020).

Además, se consideran las siguientes medidas adicionales para el escenario NDC+, que pretenden reforzar a las anteriormente mencionadas, y complementarlas en términos de protección y el manejo sostenible de los ecosistemas y la biodiversidad:

• Manejo sostenible de bosques de algas pardas:

Esta medida incorpora el diferencial de captura de GEI que se genera debido al manejo de algas pardas de las especies *Lessonia nigrescens*, *Lessonia trabeculata* y *Macrocystis spp.* Los valores de captura de GEI provienen de Vásquez et al. (2013). Por otro lado, la medida contribuye a la conservación de estos ecosistemas marinos.

• Aumento de la superficie de áreas silvestres protegidas:

Esta medida considera la creación de nuevas reservas y parques nacionales, que por un lado aumentan la

superficie de bosque gestionado y, por otro, aportan a la conservación de bosque nativo y ecosistemas terrestres. La medida se inicia en 2030 y considera que para 2050 hay 100.000 hectáreas más de bosque, que ingresan a la estimación de captura de carbono en la categoría INGEI de parques y reservas, donde se excluye aquellas hectáreas correspondientes a renovales y bosque en equilibrio.

• Reducción de la producción de papel:

Los productos de madera recolectada retienen carbono de la cosecha forestal por distintos periodos según el producto. Esta medida contabiliza el efecto de un cambio en la matriz de producción, asignando una variación del 10% de papel, celulosa y rollizo industrial a madera aserrada, lo cual aumenta el carbono retenido en el mediano plazo.

• Continuación de la medida de forestación:

Esta medida considera extender lo propuesto en la medida de forestación descrita previamente, agregando paulatinamente hectáreas para forestar en 2030-50, de modo de llegar a un total de 300.000 hectáreas al final del periodo, de las cuales 150.000 hectáreas corresponden a cubierta forestal permanente y 150.000 hectáreas, a plantaciones forestales.

• Continuación de la medida de aumento de la superficie de bosque nativo bajo plan de manejo:

Esta medida sigue la misma línea que la medida de la NDC “Aumento de la superficie de bosque nativo bajo plan de manejo” descrita previamente, y su objeto es incrementar paulatinamente la superficie manejada de bosque nativo en el periodo 2030–50, de modo de alcanzar un total de en 150.000 hectáreas manejadas al final del periodo.

Las incertidumbres consideradas dentro del modelo se muestran en el [cuadro 3.14](#).

Cuadro 3.14:
Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector forestal

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incendios que afectan hectáreas de bosque nativo | Este ítem considera la incertidumbre asociada a la ocurrencia de incendios forestales y cuanto afectan a las hectáreas de bosque nativo, dada la distribución histórica de estos eventos. Los rangos de distribución para esta incertidumbre son de -30% como mínimo y +30% como máximo. |
| Incendios que afectan plantaciones forestales | Este ítem considera la incertidumbre asociada a la ocurrencia de incendios forestales, dada la distribución histórica de estos eventos. Los rangos de distribución son de -47% como mínimo y +47% como máximo. |
| Probabilidad de ocurrencia de incendios a gran escala | Este ítem considera la incertidumbre asociada a la ocurrencia de una temporada de incendios forestales a gran escala, para un año en específico. |
| Variación en la frecuencia de cosechas forestales | Se considera que la producción de productos madereros y por lo tanto la pérdida y emisión de carbono pueden ser afectados por la variación en la frecuencia de cosechas forestales. Los rangos de distribución utilizados para esta incertidumbre son de -10% como mínimo y +10% como máximo. |
| Rendimiento de las plantaciones forestales | Dado el cambio en las condiciones climáticas, es posible que se genere una variación en el rendimiento de las plantaciones forestales, lo que a su vez afecta la cantidad de carbono absorbido. Los rangos de distribución utilizados para esta incertidumbre son de -10% como mínimo y +5% como máximo. |
| Rendimiento de las hectáreas de bosque nativo | Dado el cambio en las condiciones climáticas, es posible que se genere una variación en el rendimiento de bosques nativos, lo que a su vez afecta la cantidad de carbono absorbido. Los rangos de distribución utilizados para esta incertidumbre son de -2% como mínimo y +10% como máximo. |
| Pérdida de bosque nativo | Este ítem considera la incertidumbre sobre la pérdida de hectáreas de bosque nativo, producto de otros efectos tales como la sustitución a tierras forestales y el cambio de uso de suelo a otros usos. Los rangos de distribución utilizados para esta incertidumbre son de -30% como mínimo y +10% como máximo. |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La probabilidad de ocurrencia de incendios a gran escala fue modelada de manera no integrada con el resto de los sectores, dado que simula la aleatoriedad de los incendios para cada año. Cuando este elemento está “apagado”, el modelo muestra los incendios promedio esperados, en vez de la distribución de probabilidades de incendios para cada año. Esto se debe a que para 2050 en particular se espera que la superficie incendiada se halle entre x y $20x$, pero para el promedio entre 2040 y 2060 el valor va a estar alrededor de los $2x$, dado que para la mayoría de los años la superficie afectada es baja y solo pocas veces (~13,4%) hay grandes temporadas de incendios.

La incertidumbre considerada para las medidas, tanto en el escenario NDC como NDC+ se indican en el [cuadro 3.15](#).

Cuadro 3.15:
Fuente de incertidumbres asociadas a medidas de reducción de emisiones en el sector forestal

| Fuente de incertidumbre | Descripción |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Forestación | Para la medida de forestación se considera una incertidumbre de entre un 20% y un 105% de cumplimiento de la medida para 2030. |
| Aumento de la superficie de bosque nativo bajo plan de manejo | En este caso, se considera una incertidumbre de entre un 50% y un 105% para el cumplimiento de la medida para 2030. |
| Disminución de la degradación de bosque nativo por sustitución forestal y cambio de uso de la tierra a otros usos | Para la disminución en la degradación de bosque nativo, que se calcula en un 25% para 2030, se considera una incertidumbre de entre el 70% y el 110% de cumplimiento de la medida, lo cual queda sujeto a regulaciones más estrictas que impidan la sustitución de bosques. |
| Disminución de la degradación de bosque nativo y plantaciones por incendios forestales | En el caso de esta medida, se plantea disminuir un 25% la superficie de incendios forestales para 2030. Se considera una incertidumbre de entre un 0% y un 100% para su cumplimiento, debido a la naturaleza más impredecible de estos fenómenos. |
| Manejo sostenible de bosques de algas pardas | Esta medida considera para 2030 el manejo sostenible de 1.000 hectáreas de algas pardas de las especies <i>Lessonia nigrescens</i> , <i>Lessonia trabeculata</i> y <i>Macrocystis spp.</i> Para el nivel de implementación de esta medida, se toma en cuenta una incertidumbre de entre un 90% y un 110%. |
| Reducción en la producción de papel | Esta medida contabiliza el efecto de un cambio en la matriz de producción, asignando una variación del 10% de papel y rollizo industrial a madera aserrada. Para el nivel de implementación de esta medida, se considera una incertidumbre de entre un 90% y un 110%. |
| Aumento de áreas protegidas | Para el nivel de implementación de esta medida, se considera una incertidumbre de entre un 90% y un 110%, teniendo como base las 100.000 hectáreas propuestas. |
| Continuación de la medida de forestación hasta 2050 | Para el nivel de implementación de esta medida, se considera una incertidumbre de entre un 90% y un 110%, a partir de las 300.000 hectáreas propuestas. |
| Continuación de la medida de aumento de planes de manejo hasta 2050 | Para el nivel de implementación de esta medida, se considera una incertidumbre de entre un 90% y un 110%, a partir de las 150.000 hectáreas propuestas. |

Fuente: Elaboración propia.

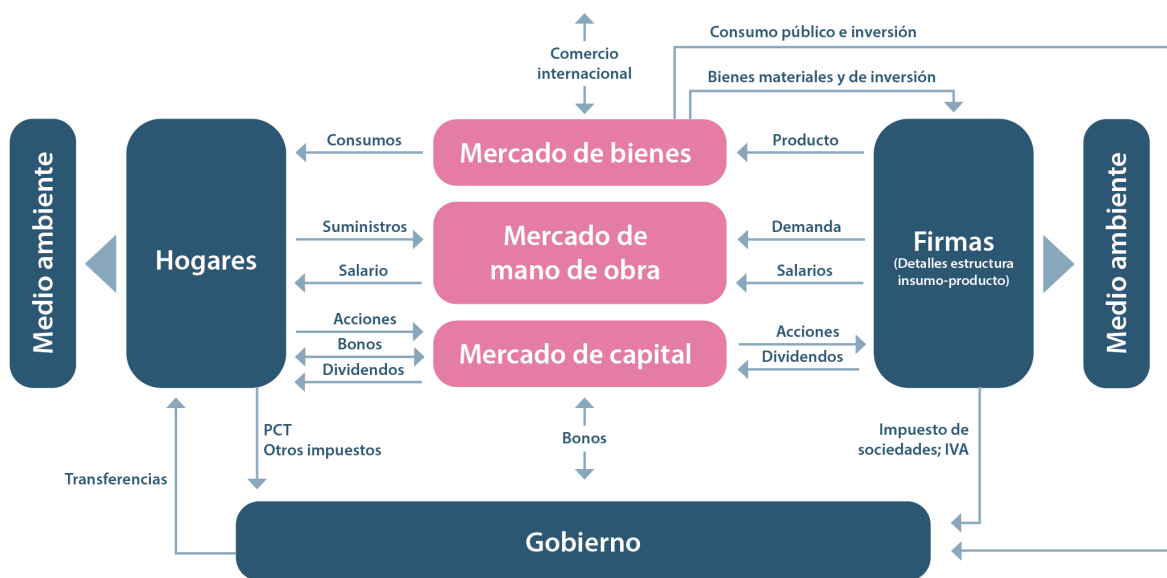
3.7 Modelo macroeconómico

Descripción general de MEMO

Para la evaluación del paquete de políticas se ha utilizado el modelo de equilibrio general estocástico dinámico MEMO, que combina dos líneas de investigación:

insumo-producto y modelos de equilibrio general. Los principales agentes del mismo y sus interrelaciones se muestran en el [gráfico 3.3](#).

Gráfico 3.3:
Esquema de interacciones de la economía chilena en el modelo MEMO



Fuente: Antosiewicz et al. (2020).

El modelo está formado por el sector de los hogares (que, a través de un agente representativo, maximiza la utilidad del consumo y el ocio); el sector empresarial (que maximiza las utilidades), y el sector gubernamental (que recauda los diversos impuestos y financia el consumo público). También se considera un sector externo responsable del comercio con el resto del mundo. Las principales características del modelo son: i) la división de la empresa en sectores calibrados en una matriz de insumo-producto, buscando la adecuación en el mercado laboral para modelar la transición de los trabajadores entre sectores, y ii) la adaptación endógena de la tecnología relacionada con el uso de energía.

La estructura sectorial del modelo es calibrada utilizando la industria chilena más reciente obtenida por una matriz de insumo-producto.¹¹ Se distinguen los siguientes sectores y productos: agricultura y forestal, minería de carbón, minería de petróleo, minería de gas, minería de cobre y otros, industria manufacturera, manufacturación de productos de petróleo refinado, electricidad de combustibles fósiles, electricidad renovable, distribución

de gas, construcción, transporte, servicios comerciales y servicios públicos. Los detalles técnicos, tales como ecuaciones exactas, calibración y métodos de solución del modelo MEMO, se pueden encontrar en Antosiewicz y Kowal (2016). La especificación exacta del modelo utilizado en este estudio difiere ligeramente del modelo descrito en Antosiewicz y Kowal (2016), ya que ha sido adaptado a las necesidades de la actual evaluación.

Estructura y emisiones por sector en base a la matriz insumo-producto

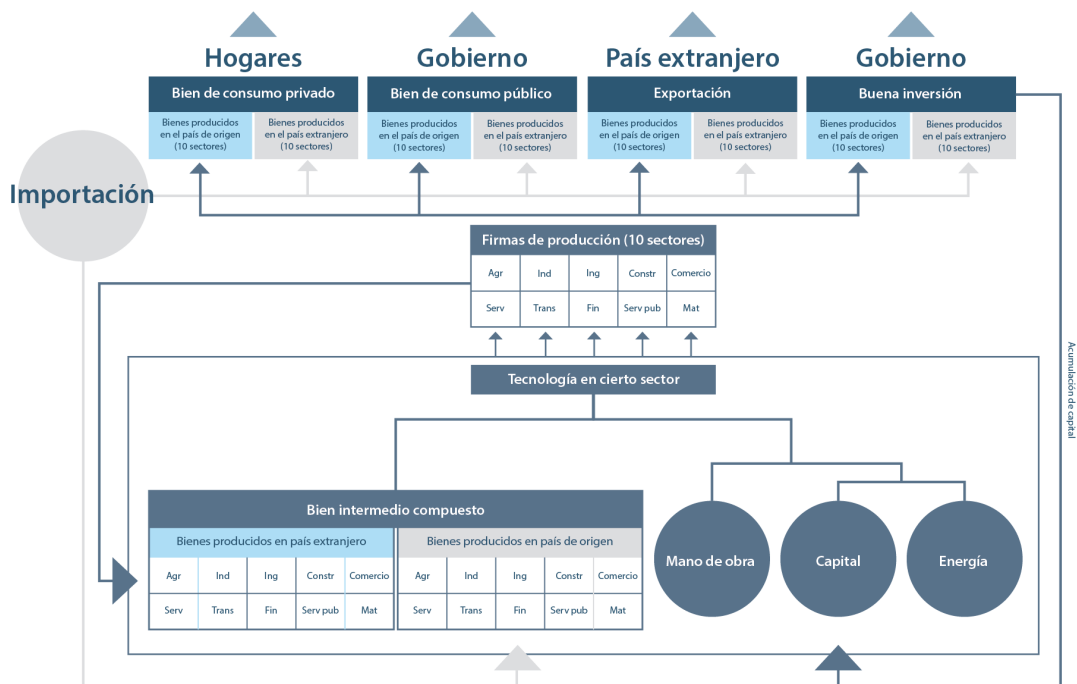
Hay varios conjuntos distintos de parámetros cuyos valores necesitan ser calculados. El conjunto principal contiene los parámetros que dirigen el lado de producción del modelo. Estos parámetros pueden especificarse además como aquellos que dirigen la estructura de valor agregado de los sectores, la inversión y la compensación de empleados en cada sector, la estructura de uso intermedio que considera los bienes producidos e importados en el país y la estructura de uso final que también toma en cuenta los productos de producción nacional e importados.

¹¹ Calibrar el modelo MEMO requiere el uso de una matriz simétrica de insumo-producto que distingue uso intermedio y final nacional e importado. La matriz simétrica de insumo-producto proporcionada por el Banco Central de Chile (BCC) no distingue uso nacional e importado. Por otra parte, la matriz asimétrica de insumo-producto del BCC sí distingue el uso nacional e importado, pero es proporcionado en un formato de producto por actividad. Por lo tanto, no es posible calibrar directamente la estructura de producción completa del modelo a esta matriz. Sin embargo, se usó para disgregar el uso de algunos sectores donde la disgregación de la matriz de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) no fue suficiente.

El gráfico 3.4 contiene un esquema de la estructura de producción. Cada empresa opera una función de producción que utiliza una especificación de elasticidad constante de sustitución, anidada para combinar los factores de producción. En la primera etapa, la empresa combina capital y energía; la segunda etapa consiste en agregar mano de obra, mientras que en la etapa final este paquete se combina con materiales (uso intermedio). El

paquete de materiales se compone de productos de cada sector, que se desglosan a su vez en la parte importada y la de producción nacional. Por el lado del uso, los bienes producidos por cada sector son adquiridos por el hogar como consumo privado, por el gobierno como consumo público, y por las empresas como inversión y uso intermedio, o pueden ser exportados.

Gráfico 3.4:
Esquema de agregación sectorial en el modelo MEMO



Fuente: Antosiewicz et al. (2020).

Para calibrar el lado de la firma del modelo, se utilizó la matriz de insumo-producto de la base de datos de estadísticas de la OCDE. Se trata de una matriz de 36 actividades por 36 actividades que usa la Clasificación Estándar Internacional de Todas las Actividades Económicas (ISIC-Rev4). Sin embargo, para este estudio se desagregan algunos sectores y productos que se colapsan en una sola actividad en la matriz de la OCDE. Para conducir esta desagregación, tal como la desagregación de combustibles fósiles específicos, la información se ha

complementado con una matriz de insumo-producto altamente desgregada del Banco Central de Chile (BBC). Esta matriz adicional se encuentra en un formato de 181 productos por 111 actividades (véase el gráfico 3.4).

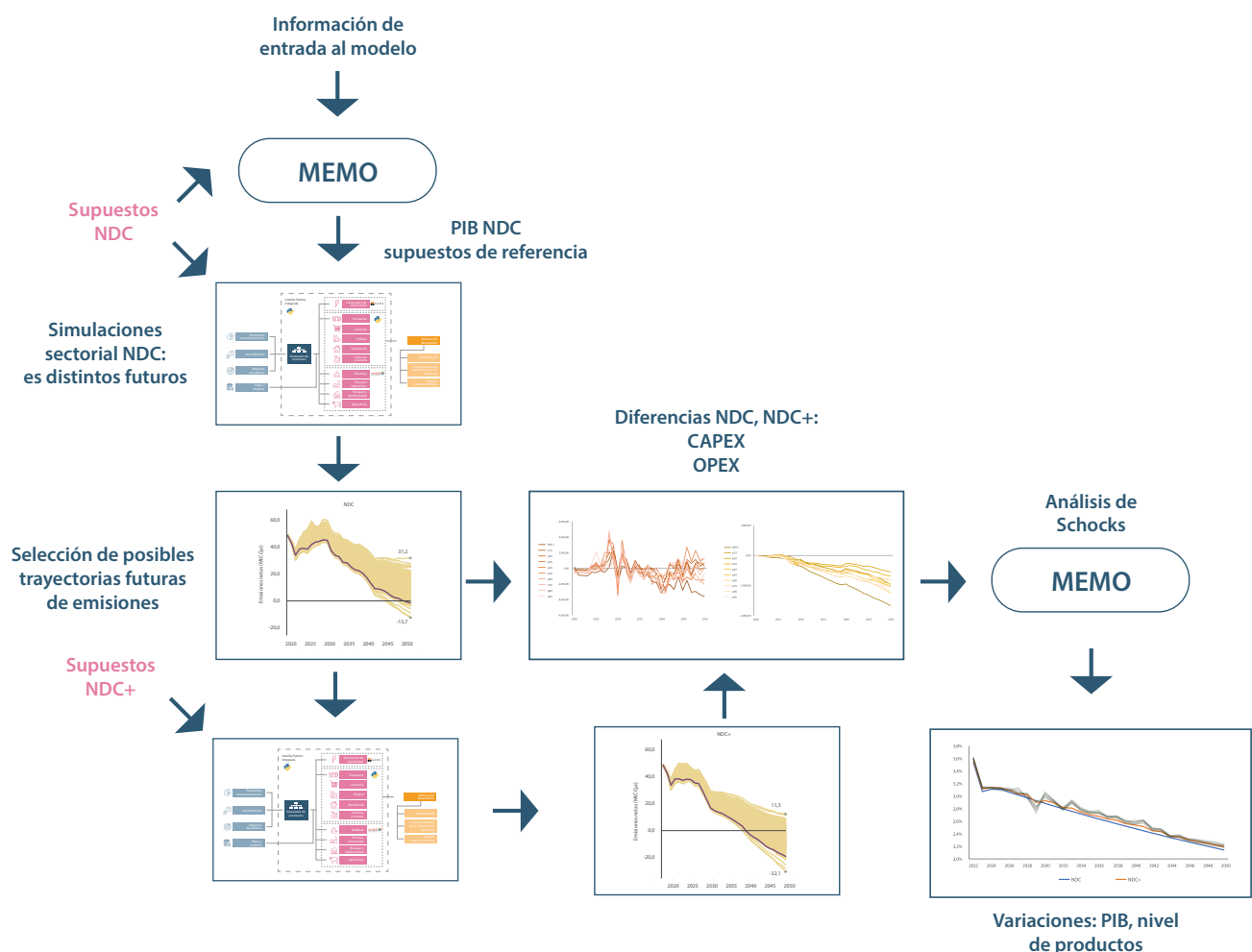
En el primer paso, la matriz de insumo-producto de la OCDE se agrega en los siguientes sectores: 1) AGR: Agricultura, Forestal y pesca; 2) MIN_ENE: Minería de Productos energéticos; 3) MIN_OTH: Minería de Metales y otros metalíferos; 4) RPP: Manufactura de productos de

petróleo refinado; 5) IND: Industria Manufacturera restante; 6) ENERGIA: Electricidad, gas, suministro de agua y alcantarillado; 7) CONSTR: Construcción; 8) TRANS: Transporte 9) SERV: Servicios Comerciales; 10) PBL: Servicios públicos.

En el segundo paso, se conduce un desglose de diversos sectores relacionados con el sector de combustibles fósiles y electricidad usando la matriz de *insumo-producto* ampliada y complementada con información de la Agencia Internacional de Energía (AIE) en relación con la generación de electricidad por fuente.

En el **gráfico 3.5** se puede observar una representación del proceso de modelación completo. En primera instancia, se utilizan las salidas de producción obtenidas en el ejercicio de modelación del paquete de contribuciones determinadas a nivel nacional analizadas en Antosiewicz et al. (2020) como insumo para los modelos sectoriales. En segunda instancia, los modelos sectoriales modelan las emisiones, con el análisis de incertidumbre, y se obtienen las sendas de CAPEX y OPEX por cada futuro de emisión. En tercer lugar, se realiza una comparación de paquetes de medidas de reducción de emisiones con sus respectivas variaciones de emisiones, CAPEX y OPEX, en comparación con la estrategia de referencia (en este caso la trayectoria de la NDC). Finalmente, se obtienen los impactos en variables de demanda agregada y producto por sectores de la economía para cada año, en comparación con la estrategia de referencia.

Gráfico 3.5: Esquema de la estrategia de modelación con el módulo de MEMO incorporado



Fuente: Elaboración propia.

Modelación de paquetes de medidas y selección de futuros

Con el modelo MEMO, se busca analizar el impacto incremental de una estrategia “más robusta” (denominada NDC+), en comparación con la estrategia de carbono-neutralidad actual (NDC). Por eso, la pregunta que busca responder MEMO es “¿Cuál será el impacto en el PIB, los componentes de demanda agregada y la actividad sectorial de tomar acciones de reducción de emisiones adicionales a las analizadas en la estrategia NDC?”

Dada la complejidad asociada a la multitud de incertidumbres sectoriales y a la gran cantidad de medidas analizadas, esto podría requerir decenas de miles de simulaciones en MEMO, lo que por restricciones temporales no sería posible. Entonces, se optó por la siguiente estrategia de simulación macroeconómica:

1. Modelar una muestra de 10 escenarios, que representan un set de futuros posibles. Para esto, se eligieron nueve

puntos de corte de los deciles de emisiones para 2050 de la estrategia NDC, adicionalmente al futuro con los parámetros evaluados con los supuestos de referencia.

2. Para cada sector se desarrolló un paquete de acciones incrementales de reducción de emisiones.

3. Para los 10 futuros seleccionados se calcularon las reducciones CAPEX y OPEX incrementales de cada paquete de medidas sectorial.

4. seleccionados sobre la base de los antecedentes estimados en el paso anterior.

Esto permitió obtener un rango del impacto incremental en el PIB, variables macroeconómicas como consumo de los hogares, inversión total (público más privado), gasto del gobierno, exportaciones e importaciones de la estrategia NDC+, en relación con la estrategia actual de carbono-neutralidad denominada como NDC. Los resultados se presentan en el capítulo 4.



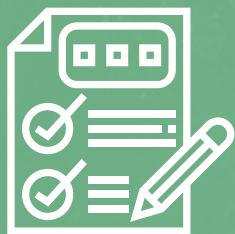
4

Resultados



4.1 Introducción

Este capítulo describe los resultados derivados del modelo integrado de evaluación desplegado en el capítulo anterior y de aplicar el marco de referencia de toma de decisiones robustas. La primera sección se ocupa del desempeño de la estrategia de carbono-neutralidad original, de contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), bajo los supuestos tendenciales, con especial énfasis en los resultados a nivel sectorial y la capacidad de la NDC de cumplir con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050. La segunda aborda el desempeño de la estrategia NDC bajo condiciones de incertidumbre. Sobre la base de lo anterior, la tercera sección presenta los resultados del análisis de vulnerabilidad de la NDC bajo incertidumbre, identificando las condiciones particulares bajo las cuales esta estrategia no cumple con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050. Finalmente, las últimas dos secciones de este capítulo analizan diferentes opciones de robustecimiento de la NDC y las implicaciones macroeconómicas de la estrategia más expansiva (i.e., NDC+) bajo diferentes futuros.

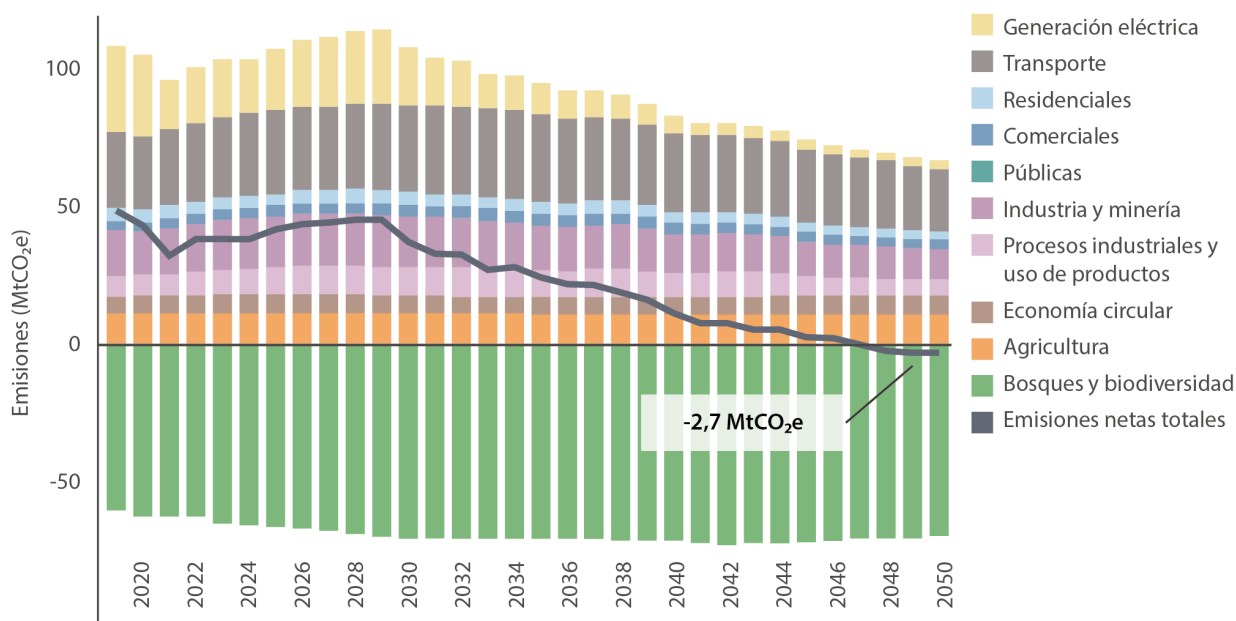


4.2 Desempeño de la estrategia de carbono-neutralidad bajo el futuro de referencia

Los resultados de este análisis señalan que la NDC es capaz de cumplir con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050, pero que manifiesta dificultades para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones y de presupuesto de carbono planteados para 2030. El gráfico 4.1 muestra los resultados de la simulación para la estrategia de carbono-neutralidad actual (i.e., NDC) bajo el futuro de referencia (i.e., supuestos actuales). Las barras reflejan la dinámica de reducción de emisiones en los diferentes

sectores; la línea sólida indica la trayectoria de emisiones netas considerando la dinámica de todos los sectores. Bajo el futuro de referencia, las emisiones netas disminuyen de 50 MtCO₂eq en 2019 a ligeramente menos que cero en 2050. Una proporción sustancial de esta disminución se debe a la reducción de emisiones en el sector eléctrico y al incremento del secuestro de carbono en el sector bosques y biodiversidad.

Gráfico 4.1: Emisiones por sector para el escenario de referencia y la estrategia NDC

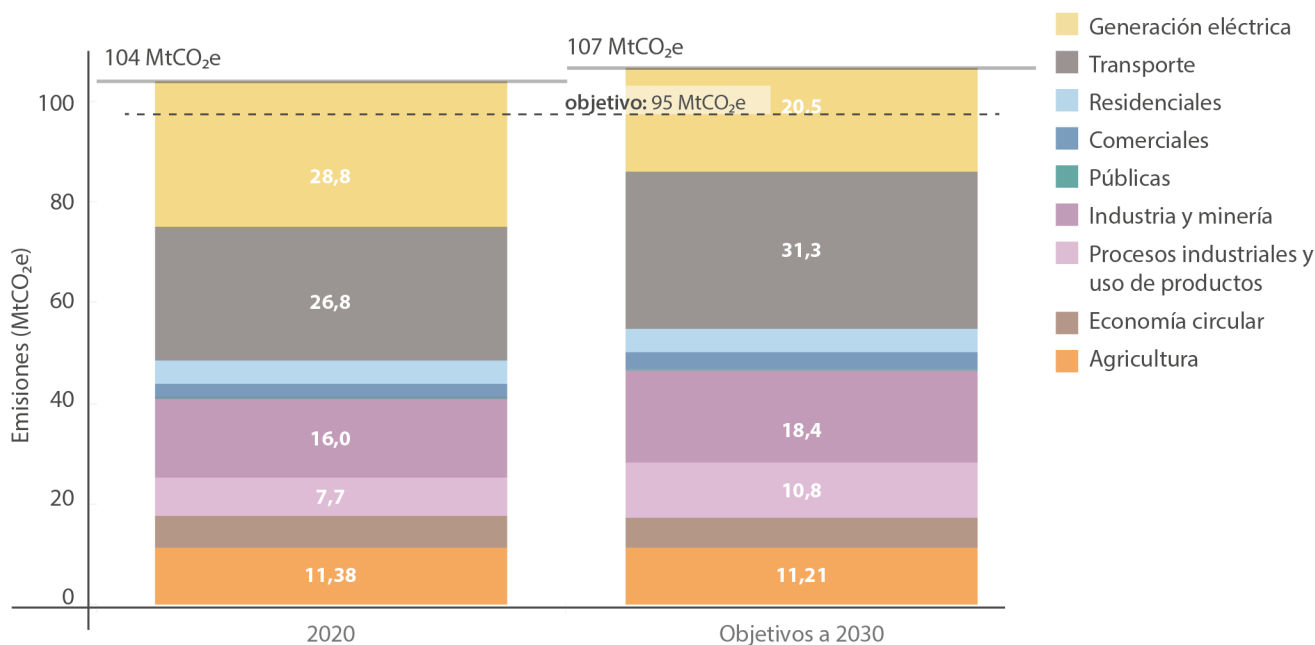


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.2 describe el desempeño de la estrategia NDC comparativamente en 2020 y 2030 para todos los sectores, excepto bosques y biodiversidad. La línea punteada indica el objetivo de emisiones en 2030 planteado por el gobierno de Chile, pero en 2030 la estrategia NDC no cumple con este objetivo y, de hecho, las emisiones totales se incrementan ligeramente. Este aumento se debe principalmente a los sectores de transporte, transformación industrial, industria y minería. Las emisiones del sector eléctrico disminuyen, pero no lo

suficiente para compensar los incrementos en los sectores anteriormente listados. Finalmente, con respecto al presupuesto de carbono planteado por la NDC, estos resultados implican que las emisiones totales de 2020 a 2030 en la simulación base (1.163 MtCO₂eq) exceden el presupuesto de carbono planteado de 1.100 MtCO₂eq, esto resalta la relevancia de considerar adelantar la implementación de medidas de la estrategia NDC+, si se quiere robustecer la probabilidad de cumplir los objetivos de la NDC para 2030.

Gráfico 4.2:
Emisiones 2020 y emisiones proyectadas para 2030

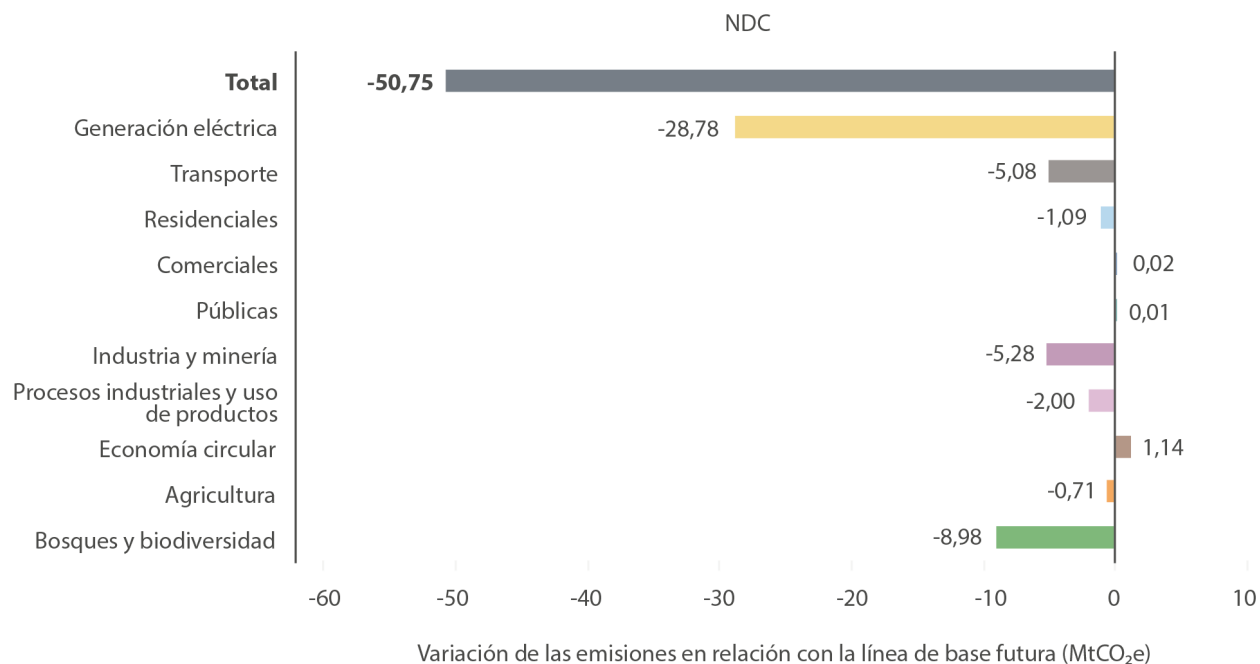


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.3 describe el cambio neto en emisiones por sector entre 2019 y 2050 bajo el futuro de referencia. La estrategia NDC reduciría las emisiones en 51 MtCO₂eq. Las reducciones más significativas se alcanzan en el sector eléctrico (e.g., -29 MtCO₂eq, 56% del total), seguido por

incrementos en la capacidad de secuestro de carbono en bosques y biodiversidad (-9 MtCO₂eq), y finalmente por los sectores industria y minería, y transporte. El resto mantiene un nivel de emisiones equiparable al de 2019.

Gráfico 4.3:
Cambio en las emisiones por sector, 2019 a 2050



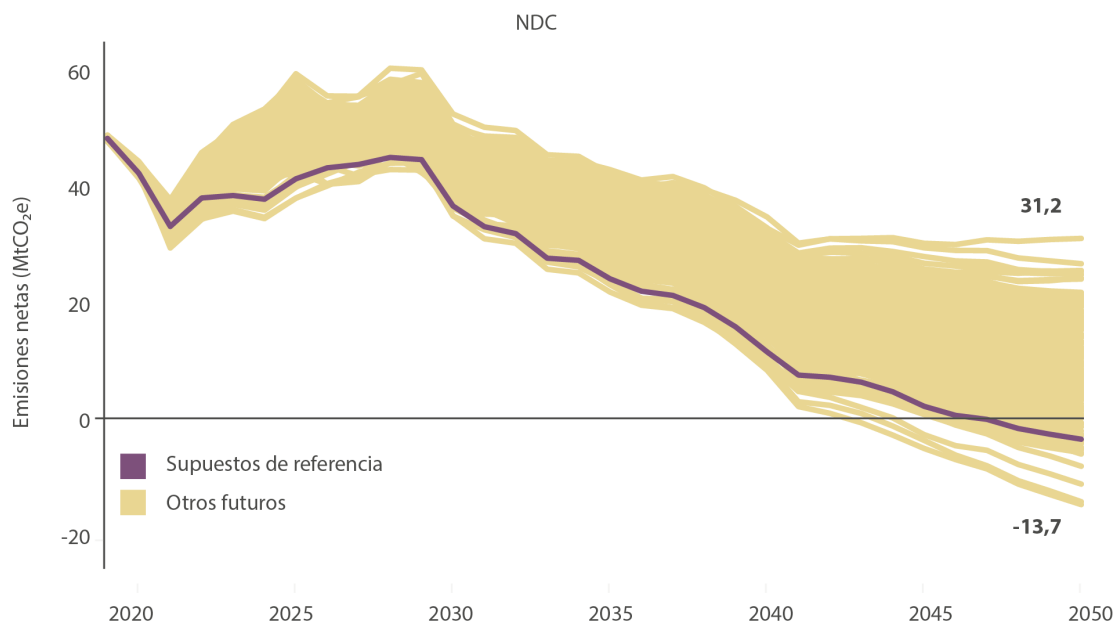
Fuente: Elaboración propia.

4.3 NDC con incertidumbres

El gráfico 4.4 refleja el desempeño de la estrategia NDC bajo 1.000 futuros diferentes. Estos futuros consideran de manera simultánea la incertidumbre asociada con una amplia gama de factores económicos, tecnológicos y ambientales (véase el capítulo 4). La línea sólida denota el futuro de referencia base descrito en la sección 5.2; las líneas grises denotan futuros individuales dentro del ensamble de 1.000 futuros considerados. Al ver el

comportamiento de cada uno de estos futuros con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050, se constata que existen muchas trayectorias de emisiones plausibles en que las emisiones terminan muy por arriba del objetivo de carbono-neutralidad. De hecho, el rango de emisiones en 2050 es bastante amplio, ya que cubre entre -13,7 MtCO₂eq y 31,2 MtCO₂eq.

Gráfico 4.4:
Emisiones netas totales hasta 2050 en 1.000 futuros para la estrategia NDC

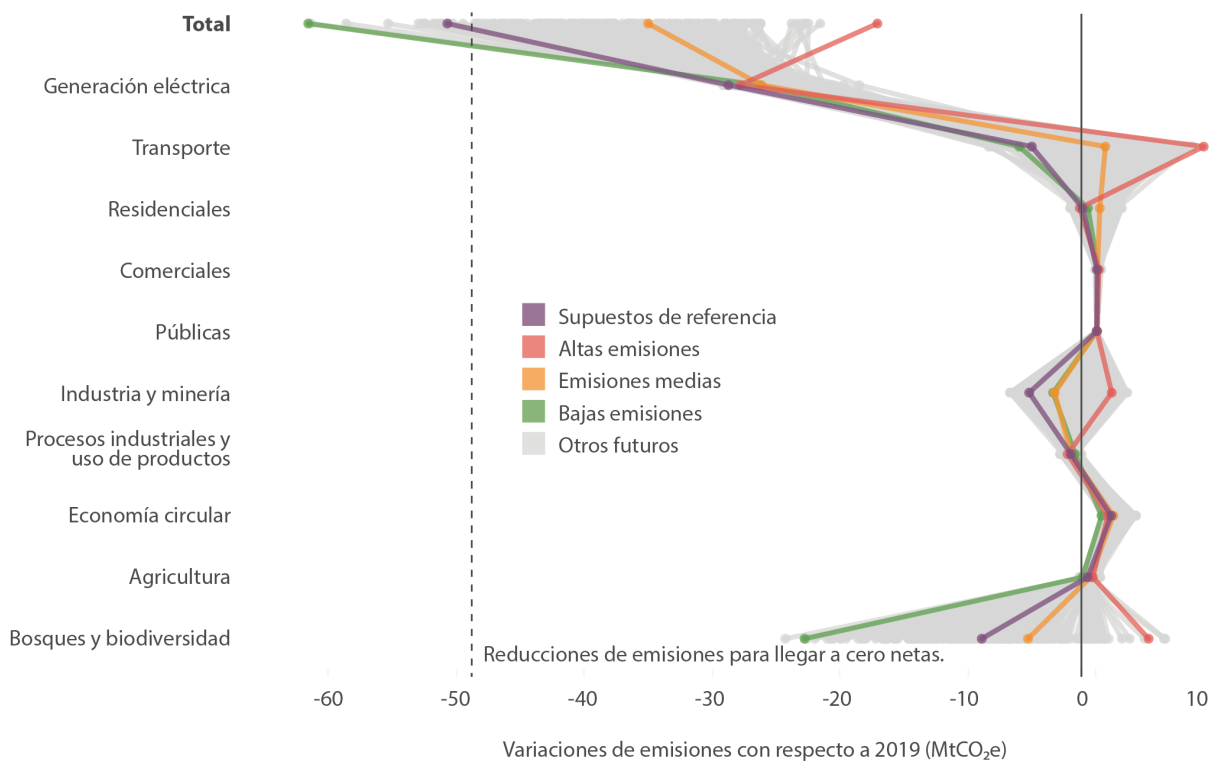


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.5 describe la variación en reducción de emisiones para los 10 sectores analizados, bajo el ensamble de 1.000 futuros considerados. Cada una de las líneas conecta un futuro específico y los diferentes renglones muestran el desempeño de la NDC en cada sector. La incertidumbre en la disminución de emisiones se origina principalmente debido a la incertidumbre asociada con los sectores transporte y bosques y biodiversidad. Los casos de mayor reducción de emisiones se deben mayormente a un incremento sustancial de la capacidad de secuestro de carbono del sector bosques y biodiversidad (línea verde del gráfico 4.5).

Los casos de menor disminución de emisiones resultan de aumentos en las emisiones del sector transporte, en combinación con incrementos netos de las emisiones en bosques y biodiversidad (línea roja del gráfico 4.5). Finalmente, de estos resultados se deduce que en teoría podría ser factible un futuro en el que las reducciones de emisiones netas totales fueran aún menores si las reducciones de emisiones en industria y minería fuesen mayores a las planteadas por la NDC, en combinación con un desempeño favorable de todos los demás sectores, similar al indicado como “emisiones bajas” en el gráfico 4.5. Esto disminuiría las emisiones en otros 3 MtCO₂eq.

Gráfico 4.5:
Cambio en las emisiones por sector para cada uno de los 1.000 futuros



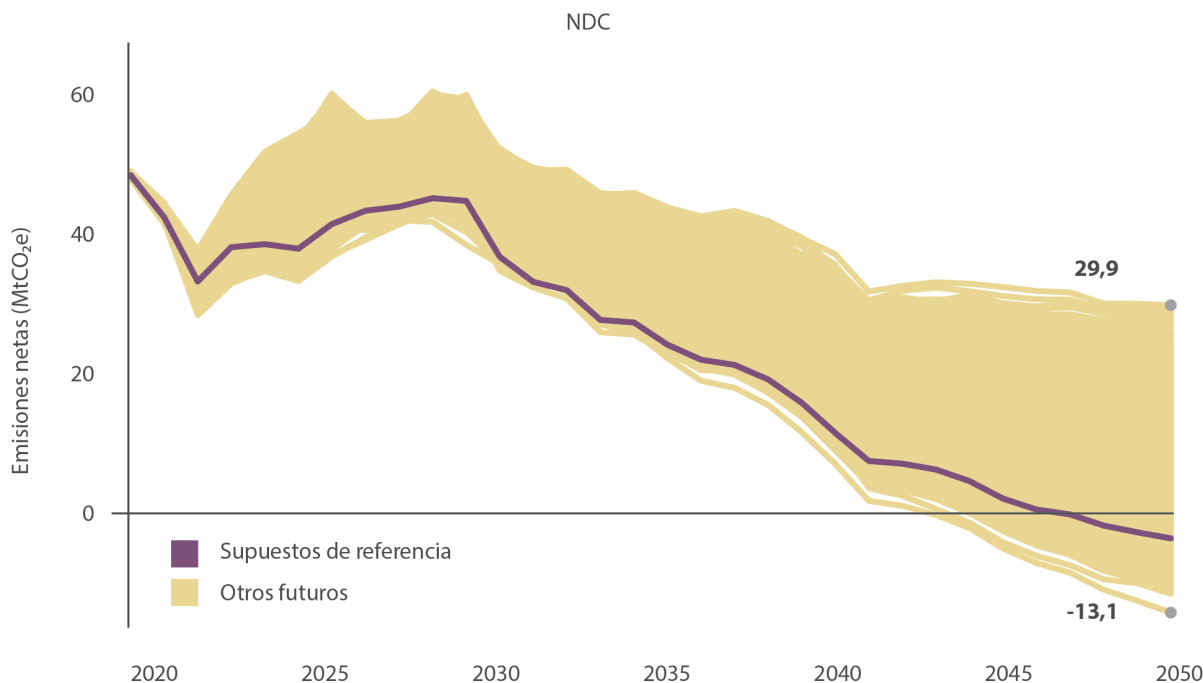
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se ejecutó un experimento que considera 1.001 futuros en lugar de 101, para verificar si estos hallazgos dependían del tamaño de la muestra, y se

observó que el rango de variación del ensamble de 1.001 futuros es muy semejante al descrito con anterioridad (véase el gráfico 4.6).

Gráfico 4.6:

Emisiones netas totales hasta 2050 en 1.001 futuros para la estrategia NDC



Fuente: Elaboración propia.

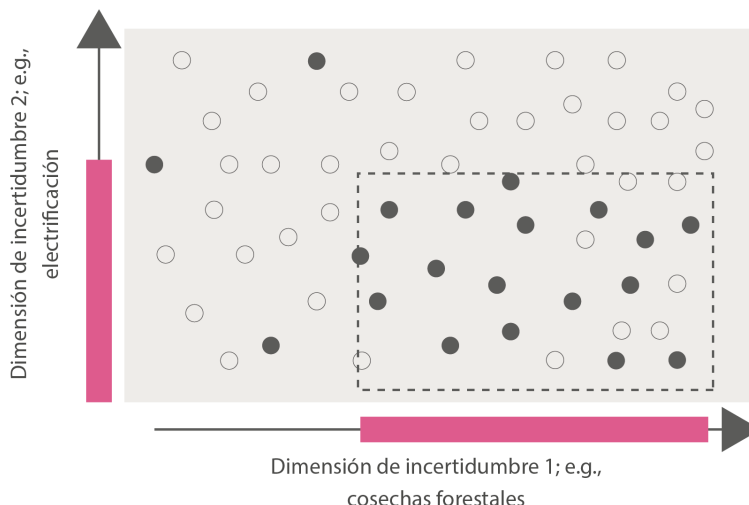
4.4

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad en un estudio de toma de decisiones robustas se basa en la aplicación del método de descubrimiento de escenarios (Bryant y Lempert, 2010; Groves y Lempert, 2007; Molina-Pérez, et al., 2019) El método consiste en realizar experimentos de simulación empleando muestreo estratificado uniforme sobre los factores de incertidumbre considerados a través de técnicas de reducción de varianza (i.e., hipercubo latino), que hacen altamente eficiente el experimento. Después, estos resultados se clasifican en dos grupos: aquellos que cumplen con los objetivos estratégicos (éxito: alcanzar la

carbono-neutralidad) y aquellos que no lo hacen (fracaso: no cumplir el objetivo de carbono-neutralidad). Finalmente, se emplean técnicas de aprendizaje estadístico para identificar clústeres con alta densidad de casos de interés (i.e., fracaso). El objetivo es poder describir las condiciones de vulnerabilidad de una estrategia como un clúster de resultados que a su vez se describe como la combinación de rangos de incertidumbre específicos (gráfico 4.7). Este proceso permite: 1) discriminar los factores de incertidumbre más relevantes para el análisis y 2) sintetizar los resultados del análisis numérico.

Gráfico 4.7:
Ejemplo de clusterización de futuros para dos dimensiones



Fuente: Elaboración propia.

Para este estudio, el análisis de vulnerabilidad se llevó a cabo en dos fases. En la primera se realizó un análisis de sensibilidad estándar con el que se identificaron los factores de incertidumbre que tendrán mayor impacto marginal en las emisiones totales en 2050. En la segunda, los resultados del análisis de sensibilidad se emplearon como insumos para el proceso de descubrimiento de escenarios, descrito con anterioridad. El objetivo de esta segunda fase es identificar combinaciones de rangos de valores de los factores de incertidumbre que conduzcan a condiciones de vulnerabilidad (e.g., no cumplir con la meta de carbono-neutralidad en 2050).

El gráfico 4.8 es un gráfico de tornado que muestra los resultados del análisis de sensibilidad. En él cada uno de los factores se ha ordenado en función del impacto marginal en la respuesta de interés (i.e., emisiones totales en 2050). El tamaño de la barra indica el tipo de shock simulado en los factores de incertidumbre. La barra de mayor tamaño señala variaciones positivas con respecto del valor referencial; la de menor tamaño, variaciones negativas. El eje horizontal denota el tipo de perturbación generada por la variación del parámetro. A la derecha se encuentran perturbaciones positivas sobre el nivel de emisiones en 2050; a la izquierda, perturbaciones negativas. La primera columna describe la sensibilidad de los factores exógenos (Xs); la segunda, la sensibilidad de las acciones de reducción de emisiones (xLs).

De acuerdo con los resultados, los cuatro factores exógenos que generan una mayor perturbación en los niveles de emisiones en 2050 están asociados con el sector forestal:

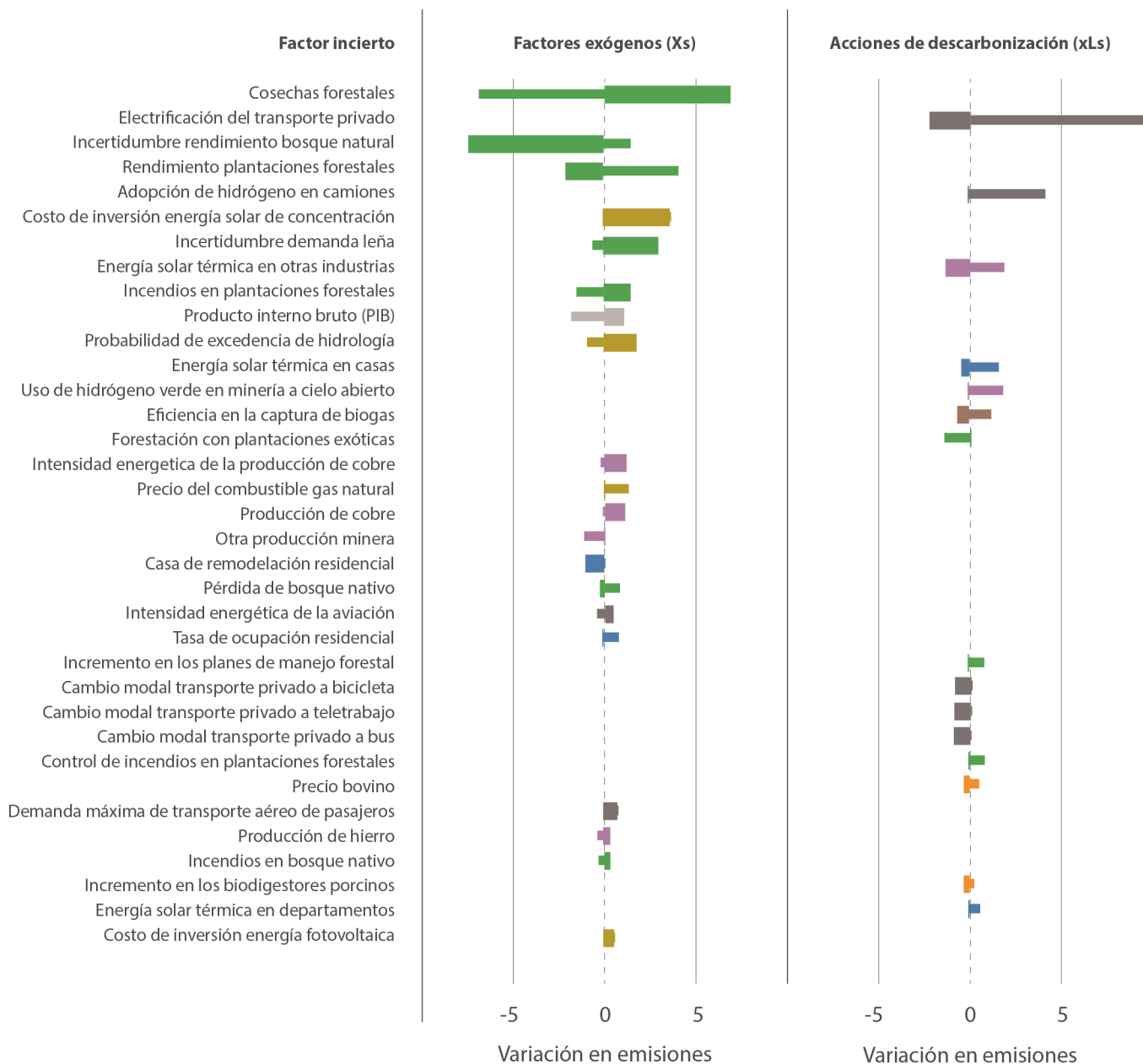
- Frecuencia de cosechas forestales.
- Rendimiento de bosques nativos.
- Rendimiento plantaciones.
- Demanda de leña.

Adicionalmente, dos factores del sector transporte también muestran un impacto marginal considerable sobre el nivel de emisiones en 2050:

- Electrificación del transporte privado.
- Adopción de hidrógeno en camiones.

Finalmente, existen otros factores de importancia asociados con el sector industria y minería y el sector electricidad. Estos son: el producto interno bruto (PIB), el costo de inversión de energía termosolar de concentración, la probabilidad de excedencia hidrológica, los niveles de producción de cobre y la intensidad energética de diversas actividades industriales.

Gráfico 4.8:
Análisis de sensibilidad de emisiones de 2050 respecto de factores inciertos



— Variación negativa
— Variación positiva

General
Generación eléctrica
Transporte

Residencial
Comercial
Público

Industria y minería
Procesos industriales y uso de productos

Economía circular
Agricultura
Bosques y biodiversidad

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis de sensibilidad permite entender el efecto individual sobre las emisiones en 2050 de cada una de las incertidumbres consideradas. Sin embargo, estos resultados no posibilitan examinar por qué las interacciones entre estos factores generan condiciones de vulnerabilidad. Por eso, en la segunda fase del análisis se ha empleado el método de descubrimiento de escenarios, para identificar de manera cuantitativa las combinaciones de factores de incertidumbre asociadas con futuros de altas emisiones en el ensamble experimental considerado. A tal efecto, las diferentes trayectorias de emisiones se transformaron en un conjunto de resultados con dos categorías: i) futuros vulnerables, es decir, aquellos que resultan en altas emisiones en 2050 (i.e., superiores a 5 MtCO₂eq), y ii) futuros no vulnerables, es decir, aquellos que implican trayectorias de emisiones de carbono-neutralidad. Desde este enfoque, la combinación de factores asociados con una alta proporción de futuros vulnerables se define como una condición de vulnerabilidad de la NDC.

Para identificar esas condiciones de vulnerabilidad, se analizaron diferentes combinaciones de valores para los factores de incertidumbre de mayor sensibilidad, considerando las 1.000 trayectorias de la estrategia NDC. Del análisis, se desprenden dos condiciones de vulnerabilidad: i) la correspondiente a “Bajo nivel de secuestro de los bosques y baja tasa de electrificación del transporte” (vulnerabilidad 1 o V1) y ii) la identificada como “Alto costo de tecnologías solares, baja descarbonización del transporte de carga y alta intensidad energética en la producción de cobre” (vulnerabilidad 2 o V2).

La vulnerabilidad 1 está definida por la combinación de cuatro condiciones:

- Alta frecuencia de cosecha forestal.
- Bajo rendimiento de bosques nativos.
- Bajo rendimiento de plantaciones.
- Baja electrificación del transporte privado (respecto del total).

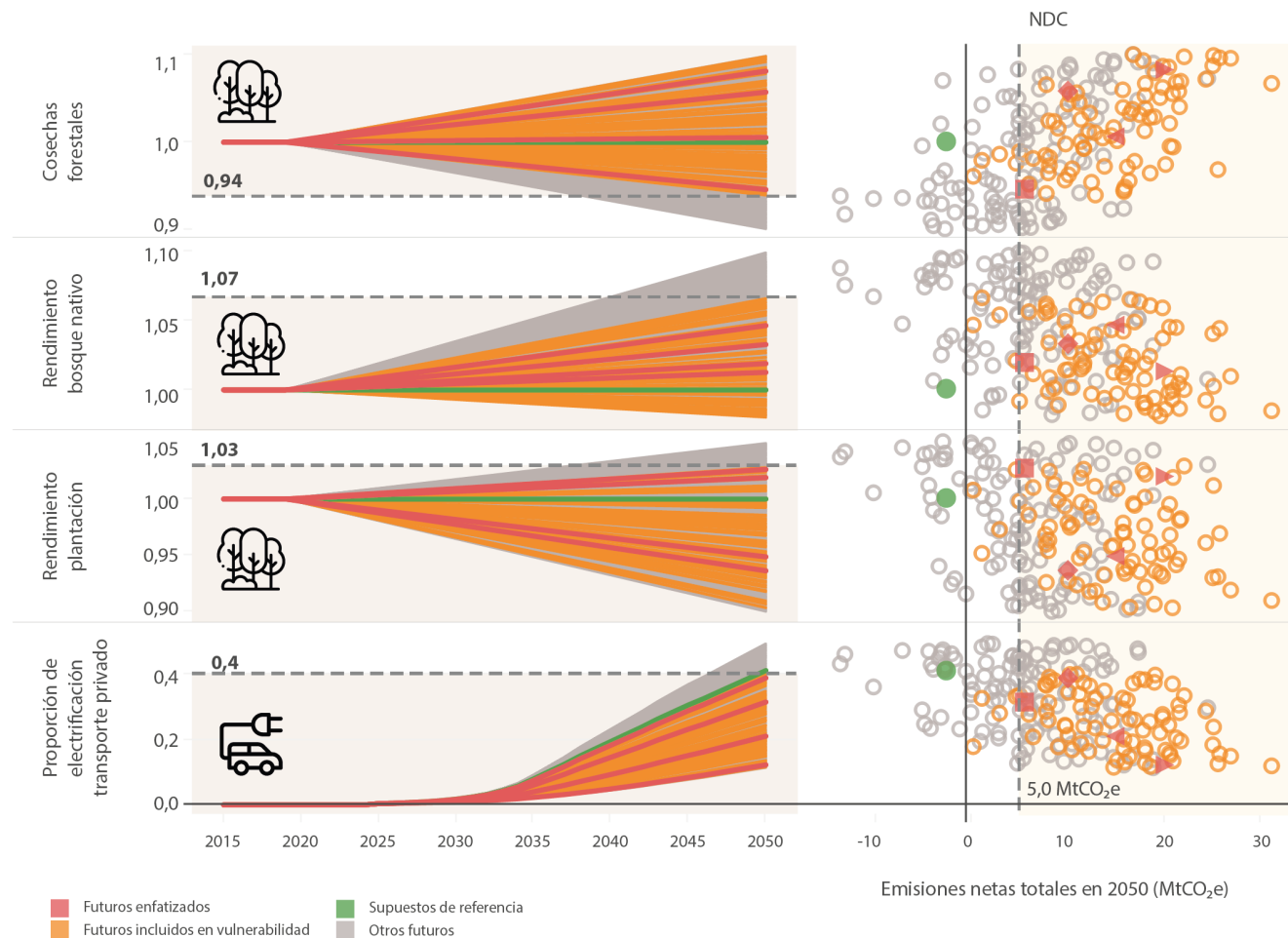
Estas condiciones capturan el 55% de todos los casos en que las emisiones en 2050 se encuentran por encima de 5,0 MtCO₂eq (79/143). Adicionalmente, dentro del conjunto de futuros que comparten estas condiciones, el 94% constituyen casos de altas emisiones.

Estas condiciones capturan el 55% de todos los casos en que las emisiones en 2050 se encuentran por encima de 5,0 MtCO₂eq (79/143). Adicionalmente, dentro del conjunto de futuros que comparten estas condiciones, el 94% constituyen casos de altas emisiones.

El [gráfico 4.9](#) describe estas condiciones de vulnerabilidad de manera cuantitativa. El panel de la izquierda muestra las trayectorias en el tiempo para cada uno de estos factores de incertidumbre. El de la derecha refleja la dispersión de resultados con respecto a cada una de estas dimensiones de incertidumbre y las emisiones totales en 2050. Los futuros incluidos en esta condición de vulnerabilidad se señalan con las líneas naranjas en el panel de la izquierda y con los círculos de ese mismo color en el de la derecha. Las cuatro líneas rojas y los cuatro puntos rojos representan cuatro futuros dentro de la vulnerabilidad, que conducen a aproximadamente 5 MtCO₂eq, 10 MtCO₂eq, 15 MtCO₂eq y 20 MtCO₂eq de emisiones. Estos futuros se utilizan como referencia al evaluar cómo cambia la distribución de resultados bajo las estrategias revisadas, descritas más adelante.

Gráfico 4.9:

Factores de vulnerabilidad 1 a lo largo del tiempo y diagrama de dispersión del valor del factor 2050 y las emisiones netas en 2050 para 1.000 futuros para la estrategia NDC



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los factores de vulnerabilidad 1 a lo largo del tiempo se encuentran a la izquierda; el diagrama de dispersión del valor del factor 2050 y las emisiones netas en 2050 para 1.000 futuros, a la derecha. Las líneas y círculos naranjas corresponden a futuros descritos por la vulnerabilidad 1. Las líneas y círculos grises corresponden a futuros que no están descritos por vulnerabilidad 1. Las líneas y puntos verdes indican factores y resultados de emisiones para el futuro de referencia. Las líneas y puntos de color rojo oscuro indican tres futuros seleccionados para mostrar un rango de resultados de emisiones (~ 5, ~ 10 y ~ 20 MtCO₂eq).

La vulnerabilidad 1 no captura la totalidad de los futuros de altas emisiones (i.e., excluye un 45% de los futuros de altas emisiones). Para identificar los factores de incertidumbre asociados con los futuros vulnerables no capturados por la vulnerabilidad 1, se ha ejecutado un experimento adicional. En él, los cuatro factores asociados con la vulnerabilidad 1 se mantienen constantes, mientras que el resto de las incertidumbres consideradas varían en los 1.000 futuros analizados.

De manera similar, empleando el método de descubrimiento de escenarios, se identificó **la condición de vulnerabilidad 2** (“Alto costo de tecnologías solares, baja descarbonización del transporte de carga y alta intensidad energética en la producción de cobre”), que captura el 42% del resto de los casos de altas emisiones no identificados por la vulnerabilidad 1. Puntualmente, la condición de vulnerabilidad 2 está descrita por los siguientes rangos de valores:

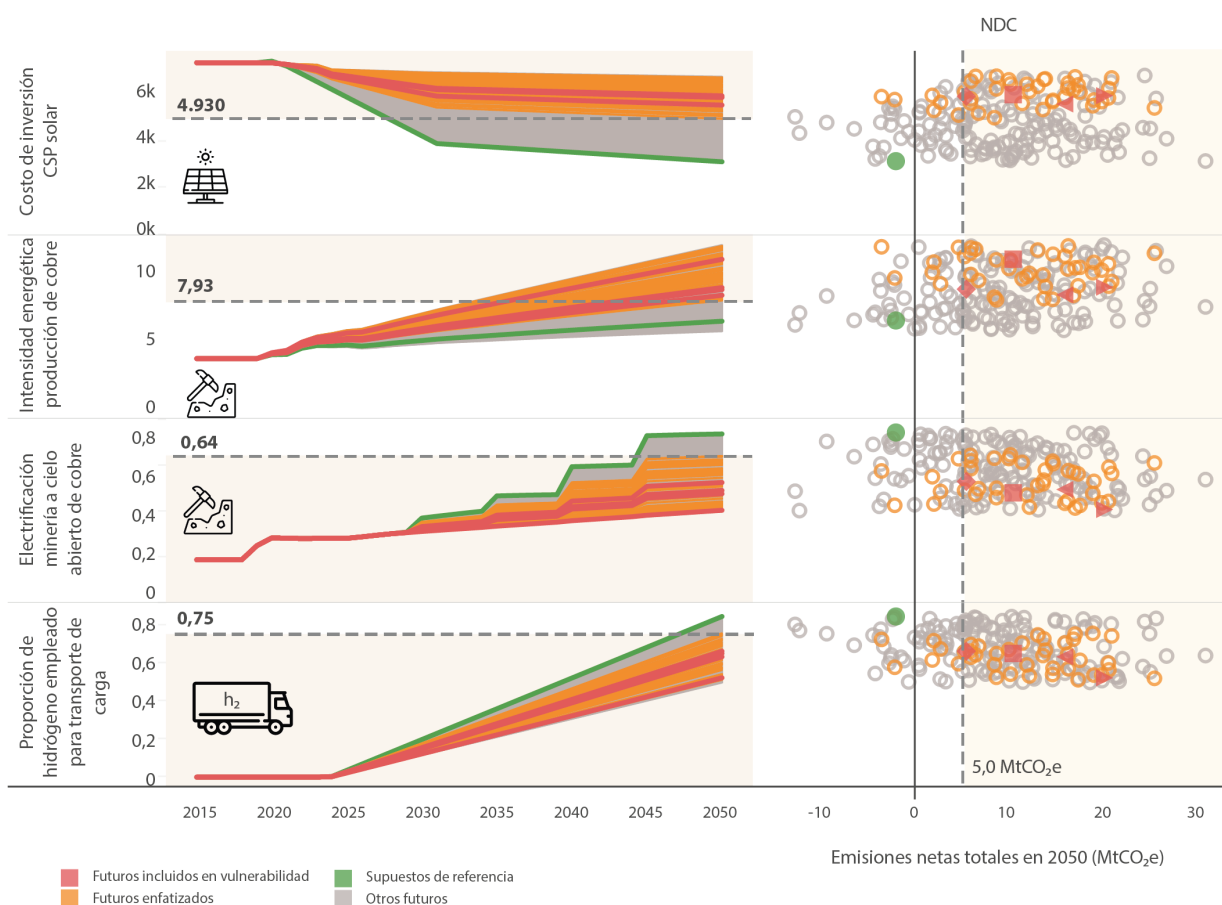
- Alta frecuencia de cosecha forestal.
- Bajo rendimiento de bosques nativos.
- Bajo rendimiento de plantaciones.
- Baja electrificación del transporte privado (respecto del total).

El gráfico 4.10 describe de manera cuantitativa la combinación de condiciones de incertidumbre asociadas

con la vulnerabilidad 2. Las cuatro líneas rojas y los cuatro puntos rojos representan cuatro futuros dentro de la vulnerabilidad 2 que conducen a aproximadamente 5 MtCO₂eq, 10 MtCO₂eq, 15 MtCO₂eq y 20 MtCO₂eq de emisiones. Estos futuros son empleados como referencia al evaluar cómo cambia la distribución de resultados bajo las estrategias revisadas a continuación.

Gráfico 4.10:

Factores de vulnerabilidad 2 a lo largo del tiempo y diagrama de dispersión del valor del factor 2050 y las emisiones netas en 2050 para 1.000 futuros para la estrategia NDC



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Nota: Los factores de vulnerabilidad 2 a lo largo del tiempo se encuentran a la izquierda; el diagrama de dispersión del valor del factor 2050 y las emisiones netas en 2050 para 1.000 futuros, a la derecha. Las líneas y círculos naranjas corresponden a futuros que están descritos por la condición de vulnerabilidad 2. Las líneas y círculos grises corresponden a futuros que no están descritos por la vulnerabilidad 2. Las líneas y puntos verdes indican factores y resultados de emisiones para el futuro de referencia. Las líneas y puntos de color rojo oscuro indican tres futuros seleccionados para mostrar un rango de resultados de emisiones (~ 5, ~ 10 y ~ 20 MtCO₂eq).

Las dos condiciones de vulnerabilidad descritas en esta sección capturan la mayoría de los futuros en los que se exceden 5 MtCO₂eq netas en 2050. En el ensamble de

futuros analizados existen otros futuros con altas emisiones; sin embargo, estas dos vulnerabilidades son las más dominantes.

4.5 Expansión de la contribución determinada a nivel nacional

Una vez identificadas las condiciones de vulnerabilidad de la estrategia NDC, el siguiente paso es examinar propuestas de expansión de la estrategia base que puedan mitigar las vulnerabilidades. Para ello, como primer ejercicio, se diseñó la estrategia NDC+, que considera

todas las acciones de expansión posibles y recomendadas por los expertos consultados durante las mesas de trabajo del proyecto. El [cuadro 4.1](#) describe las acciones adicionales incluidas en esta estrategia NDC+.

Cuadro 4.1:
Acciones adicionales incluidas en la estrategia NDC+

| Sector | Acción |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Electricidad | Retiro de plantas de carbón. |
| Transporte | Aumento del uso de bicicletas en lugar del automóvil privado. Aumento del uso de transporte público en lugar del automóvil privado. Aumento del teletrabajo. Mezcla con combustibles alternativos en aviación. |
| Residencial | Reacondicionamiento térmico de viviendas existentes. |
| Industria y minería | Nuevas fuentes de energía para la producción de cobre y acero. |
| Procesos industriales y uso de productos | Nuevas plantas de gestión de refrigerantes. |
| Economía circular | Nuevas plantas de compostaje. |
| Agricultura | Agricultura regenerativa: aplicación de enmienda orgánica. Manejo holístico del ganado. Reducción en el consumo de carne de vacuno. |
| Bosques y biodiversidad | Aumento de forestación post 2030. Aumento de la superficie de manejo forestal post 2030. Aumento de las áreas protegidas. Manejo sostenible de algas pardas. Reducción de la producción de papel. |

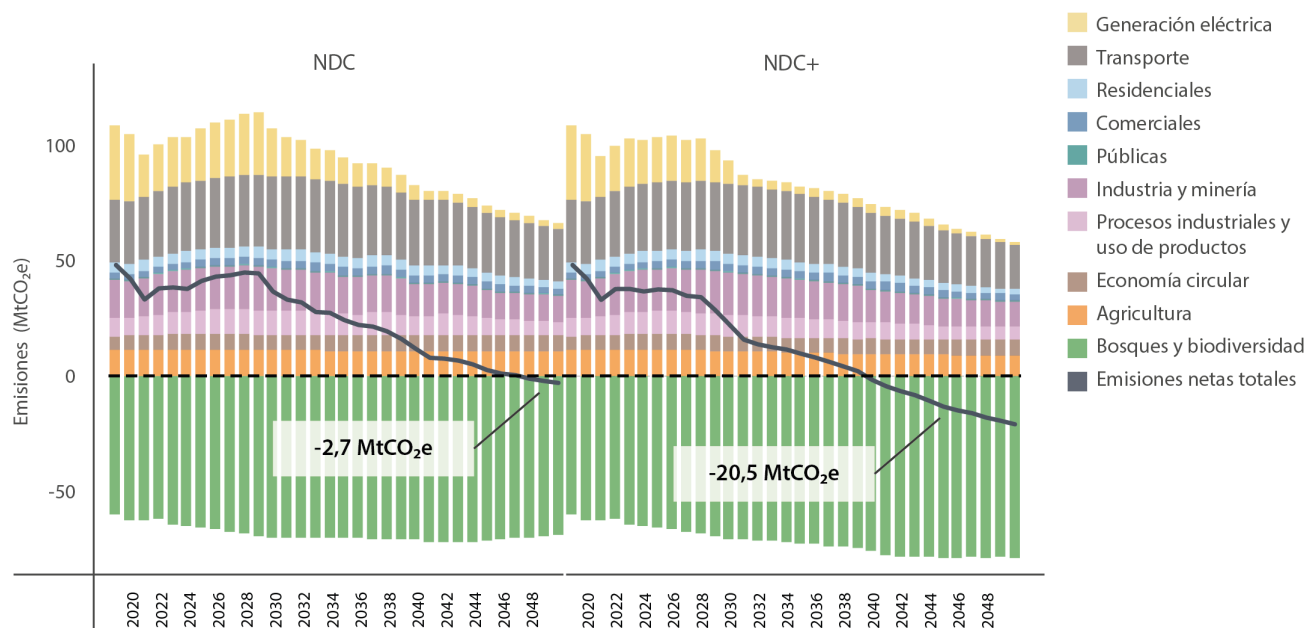
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.11 muestra de manera comparativa el desempeño de la estrategia NDC+ y de la estrategia original NDC, bajo el futuro de referencia. El desempeño de la estrategia NDC+ bajo los supuestos del futuro de referencia tiene dos diferencias importantes con respecto

de la estrategia NDC original: i) la estrategia NDC+ alcanza un mayor grado de disminución de emisiones en 2050 (i.e., -20 MtCO₂eq) y ii) también logra la carbono-neutralidad de manera más rápida que la NDC original (i.e., 2040).

Gráfico 4.11:

Emisiones por sector para las estrategias NDC v NDC+ bajo los supuestos del caso base

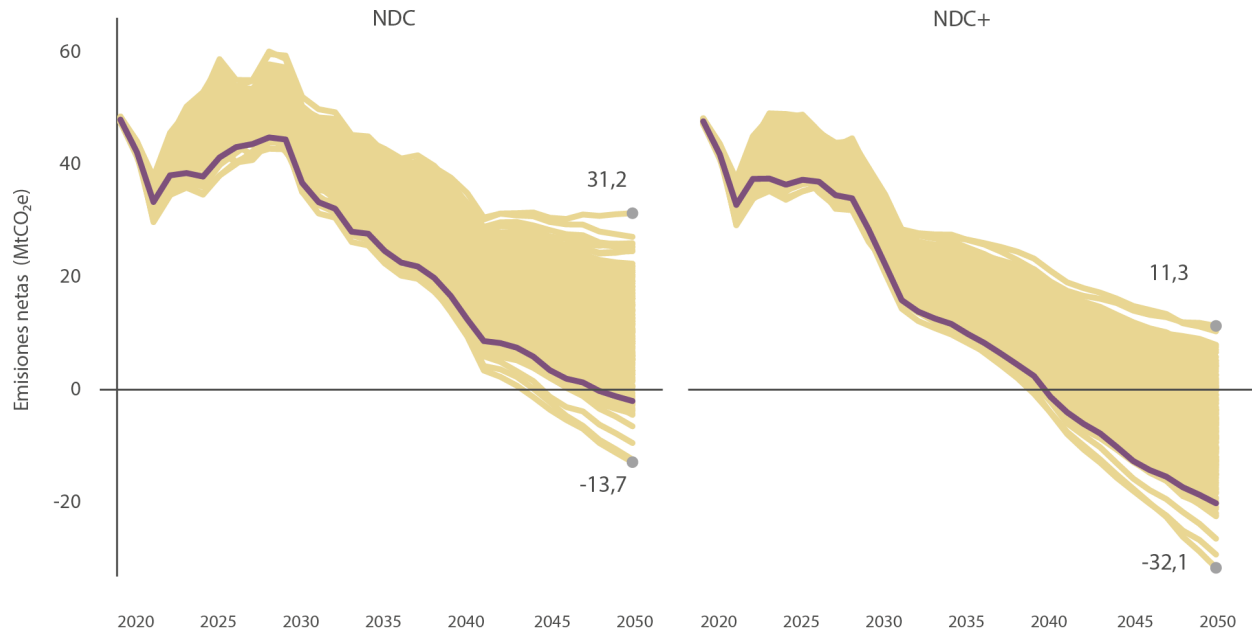


Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, el gráfico 4.12 compara el desempeño de la estrategia NDC y la estrategia NDC+ bajo el mismo conjunto de 1.000 futuros considerados en este estudio. La estrategia NDC+ cumple con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050 en un mayor número de futuros que la NDC original. De hecho, la estrategia NDC+ reduce la variación en el nivel de emisiones netas en 2050

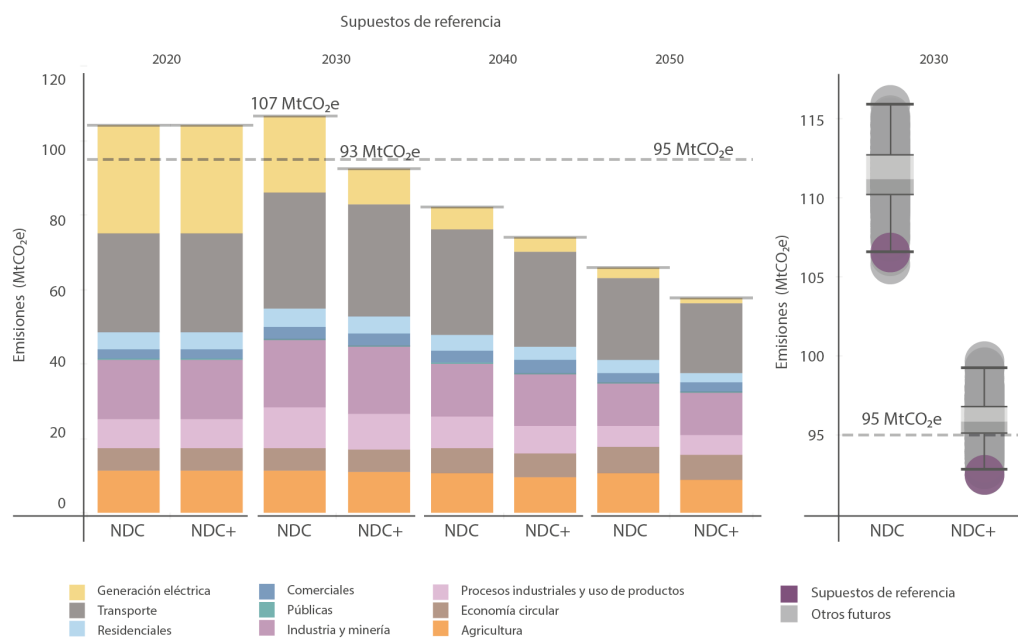
en un rango de entre -32,1 MtCO₂eq y +11,3 MtCO₂eq, y en este caso un 83% de las simulaciones resultan en futuros en donde las emisiones netas son iguales o menores a cero en 2050. Sin embargo, en un número considerable de futuros se ve que en 2050 el nivel de abatimiento es mucho mayor que el objetivo de carbono-neutralidad.

Gráfico 4.12:
Emisiones netas totales para las estrategias NDC y NDC+ bajo 1.000 futuros



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.13:
Emisiones en 2030 para supuestos de referencia y en 1.000 futuros para las estrategias NDC y NDC+



Fuente: Elaboración propia.

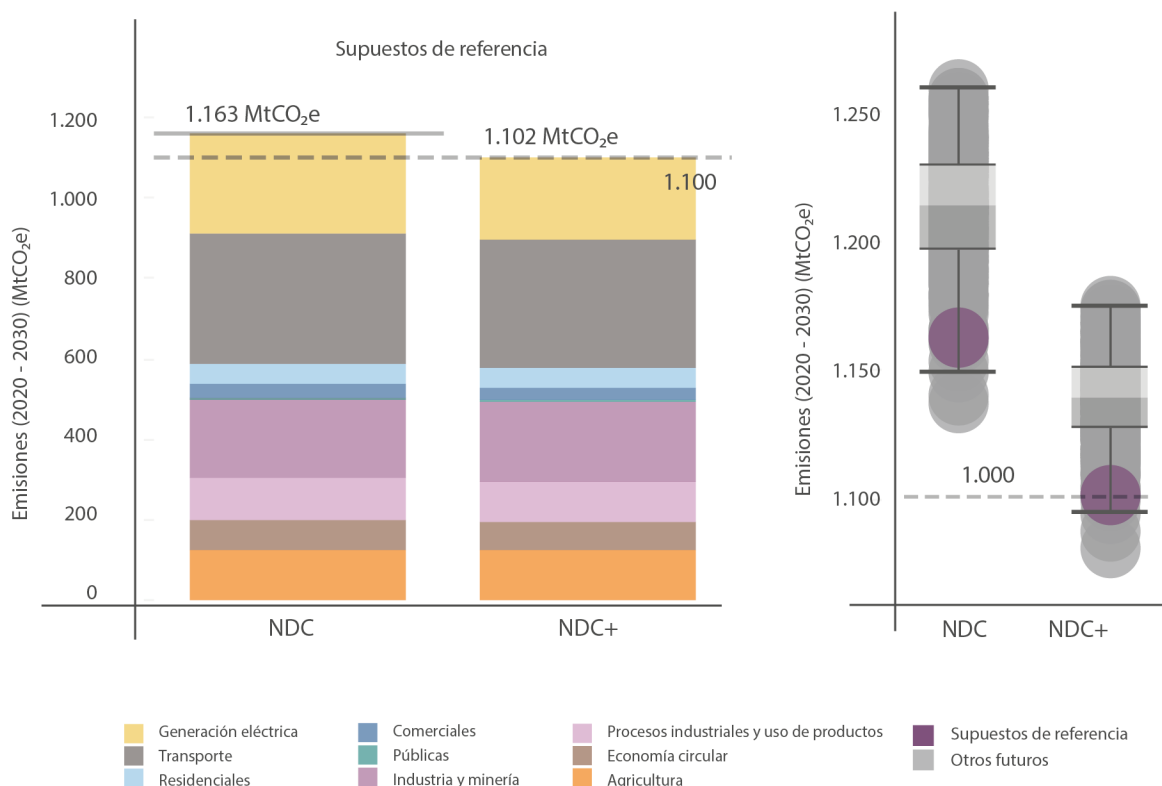
Al comparar el desempeño de estas estrategias respecto de los objetivos de reducción de emisiones en 2030, se aprecian diferencias importantes. El gráfico 4.13 realiza dicha operación en cortes de tiempo de 10 años, tomando como referencia el objetivo de reducción de emisiones de 95 MtCO₂eq en 2030. El panel de la izquierda presenta esta comparación para el futuro de referencia; el de la derecha compara su desempeño considerando el ensamble de 1.000 futuros. El primero muestra que, en contraste con la estrategia NDC original, la NDC+ cumple con el objetivo planteado por el gobierno de Chile de reducir emisiones para 2030. Esto es aún más notable al considerar el desempeño de ambas estrategias bajo incertidumbre (panel de la derecha). En este caso, la estrategia NDC original nunca cumple con el objetivo de reducción de

emisiones de 2030, mientras que la estrategia NDC+ es capaz de cumplir con este objetivo en el 25% de los futuros considerados.

El gráfico 4.14 muestra las diferencias de desempeño de las dos estrategias con respecto al presupuesto de carbono planteado por gobierno de Chile hacia 2020-2030. En este caso, la estrategia NDC + está muy cerca de alcanzar el objetivo de presupuesto de carbono de 1.100 MtCO₂eq (de 2000 a 2030) para los supuestos de referencia, mientras que la estrategia NDC original no cumple con este objetivo bajo los mismos supuestos. Sin embargo, al considerar el ensamble de 1.000 futuros de este estudio, la NDC+ cumple con el presupuesto de carbono solo en una pequeña proporción de los futuros considerados.

Gráfico 4.14:

Presupuesto de carbono (emisiones totales de 2020 a 2030) para supuestos de referencia y en 1.000 futuros para las estrategias NDC y NDC+

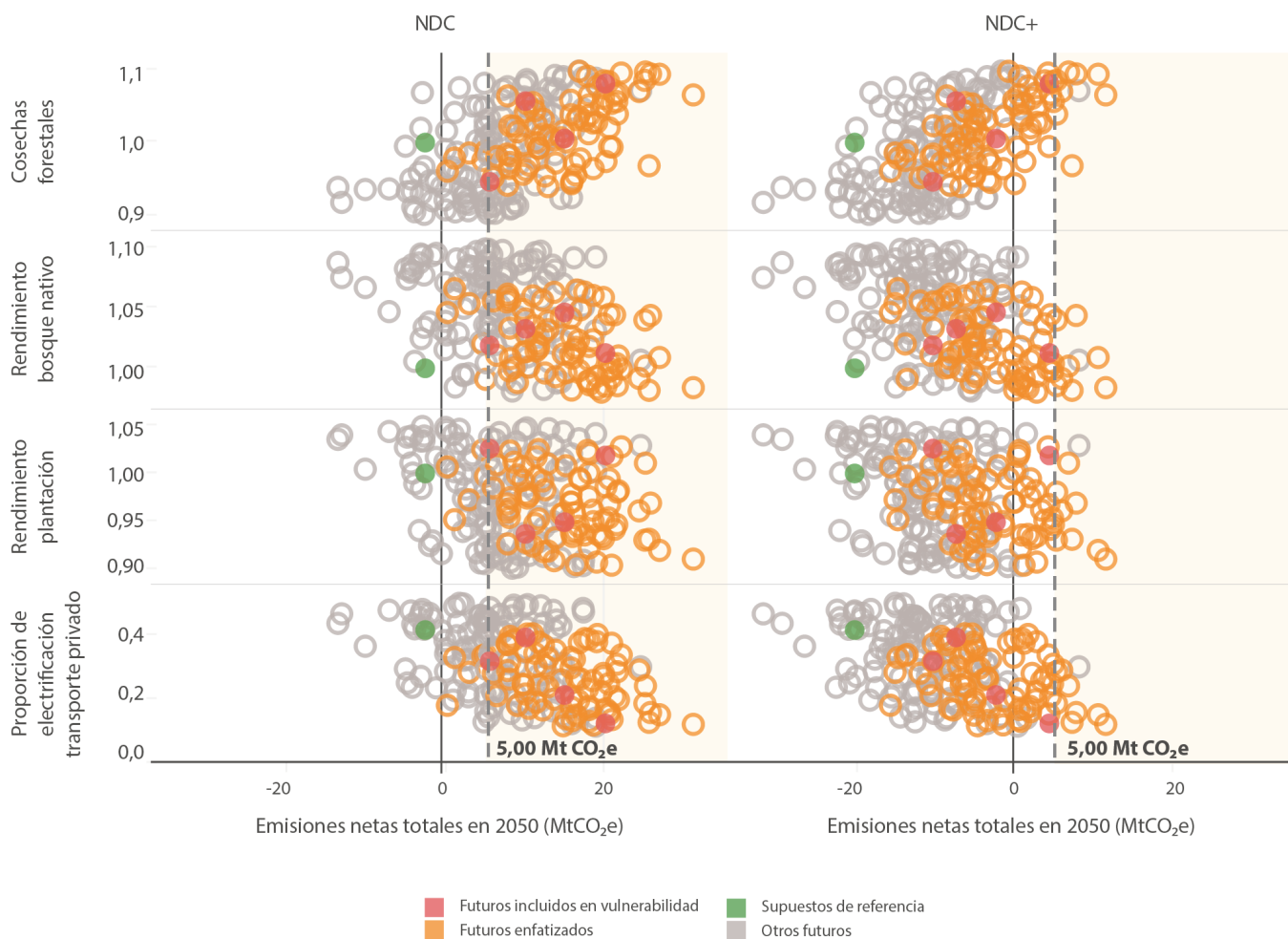


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.15 compara el desempeño de las dos estrategias considerando las condiciones de incertidumbre de la vulnerabilidad 1; en el eje horizontal se indica el umbral de vulnerabilidad para los futuros de altas emisiones (i.e., 5 MtCO₂eq). En este caso, emergen como relevantes dos diferencias en el desempeño de estas estrategias. La primera es que en el caso de la estrategia

NDC+ el número de casos por encima del umbral de 5 MtCO₂eq disminuye sustancialmente en comparación con la estrategia NDC original. La segunda es que en muchos de los casos identificados como vulnerables bajo la estrategia NDC original (i.e., círculos color naranja) dejan de serlo bajo la estrategia NDC+.

Gráfico 4.15: Emisiones netas en 2050 versus factores de vulnerabilidad 1 para las estrategias NDC y NDC+



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los círculos naranjas corresponden a futuros que están descritos por vulnerabilidad 1. Los círculos grises corresponden a futuros que no están descritos por vulnerabilidad 1. Los puntos verdes indican factores y resultados de emisiones para el futuro de referencia. Los puntos de color rojo oscuro indican tres futuros seleccionados para mostrar un rango de resultados de emisiones (~ 5, ~ 10 y ~ 20 MtCO₂eq) bajo la estrategia NDC.

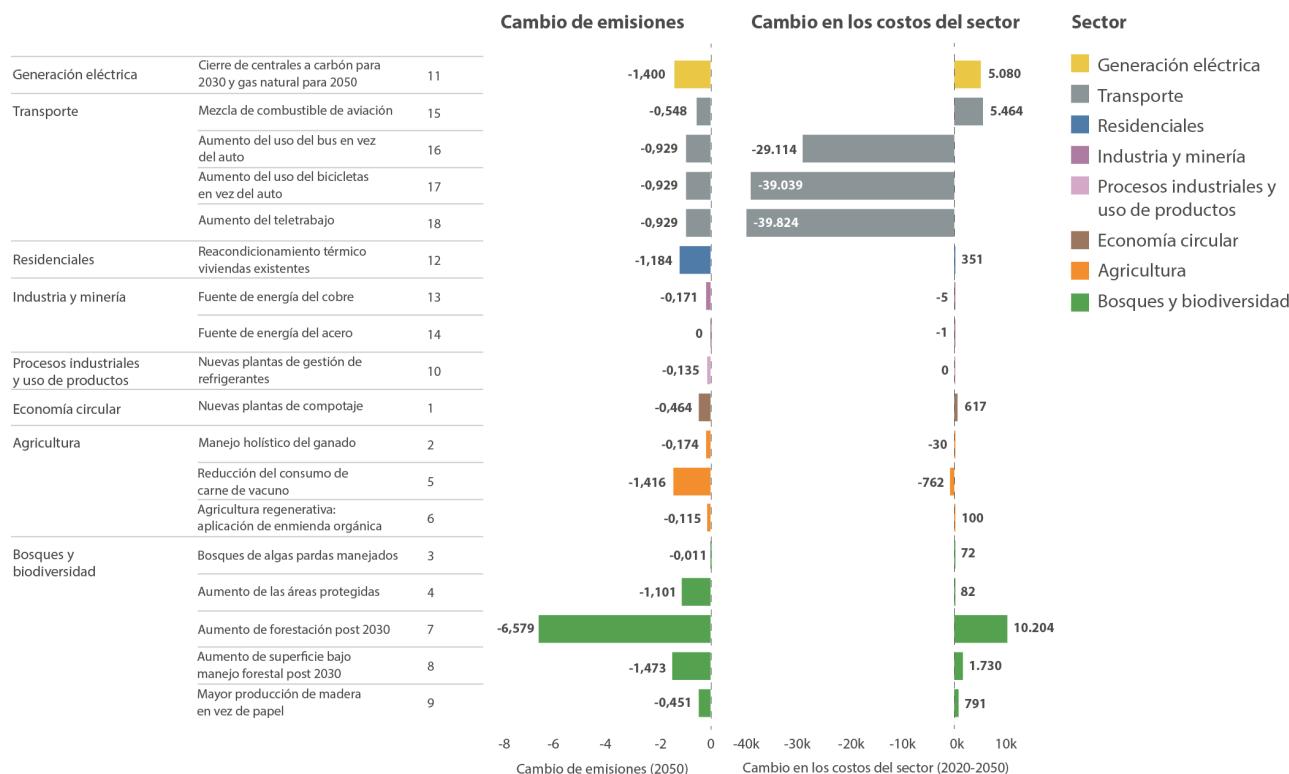
4.6 Incrementar la robustez de la estrategia NDC

El análisis del desempeño de la estrategia NDC+ muestra claramente que la expansión de las acciones de reducción de emisiones disminuye las vulnerabilidades identificadas en la estrategia NDC original. Sin embargo, en un número importante de futuros, la estrategia NDC+ exagera el grado de reducción de emisiones requerido para alcanzar el objetivo de carbono-neutralidad, lo que puede conducir a una estrategia demasiado costosa. En este sentido, es importante conocer las implicaciones en cuanto a efectos de reducción de emisiones y el costo de cada una de las acciones incluidas en la estrategia NDC+, dado que cada acción adicional de dicha estrategia disminuye las emisiones y cambia los costos de reducción de emisiones en el sector asociado. Por un lado, algunas acciones de reducción de emisiones conllevan mayores costos, como en el caso de las acciones de forestación. En contraste, otras acciones de reducción de emisiones resultan en menores costos, por que incentivan la eficiencia. Por

ejemplo, un mayor uso del transporte público reduce los costos del sistema de transporte porque es económicamente más eficiente que el transporte privado para una gran proporción de casos.

El gráfico 4.16 muestra el cambio en emisiones netas en 2050 y de costos de manera individual para el conjunto de acciones adicionales incluidas en la NDC+, bajo el futuro de referencia. Las mayores reducciones de emisiones están asociadas con más forestación; sin embargo, esta medida también resulta en mayores costos. Las siguientes cuatro acciones con el mayor potencial de reducción de emisiones son: adelantar el cierre de centrales de carbón, realizar el reacondicionamiento térmico de hogares, efectuar cambios en la dieta nacional y lograr un manejo más integral de los bosques. No todas estas medidas están asociadas también con incrementos en los costos de la estrategia de reducción de emisiones; por ejemplo, el aumento del teletrabajo y la disminución del consumo de carne de origen vacuno. Cabe resaltar que esta relación costo-beneficio de las acciones de la NDC+ no es invariante bajo incertidumbre, y que estos resultados solo están asociados al futuro de referencia.

Gráfico 4.16: Cambio en las emisiones netas para 2050 y los costos del sector



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.17 muestra esta relación costo-beneficio para el futuro de referencia de manera comparativa para todas las acciones adicionales incluidas en la estrategia NDC+. El eje horizontal indica el cambio en los costos de reducción de emisiones asociados con el sector al que pertenece la acción de expansión; el eje vertical presenta el impacto marginal de cada una de estas acciones en las emisiones en 2050. Hay cuatro grupos:

1. Acciones que reducen los costos y las emisiones netas en 2050, como la sustitución del transporte privado por un mayor uso de bicicletas, el teletrabajo y el transporte público.

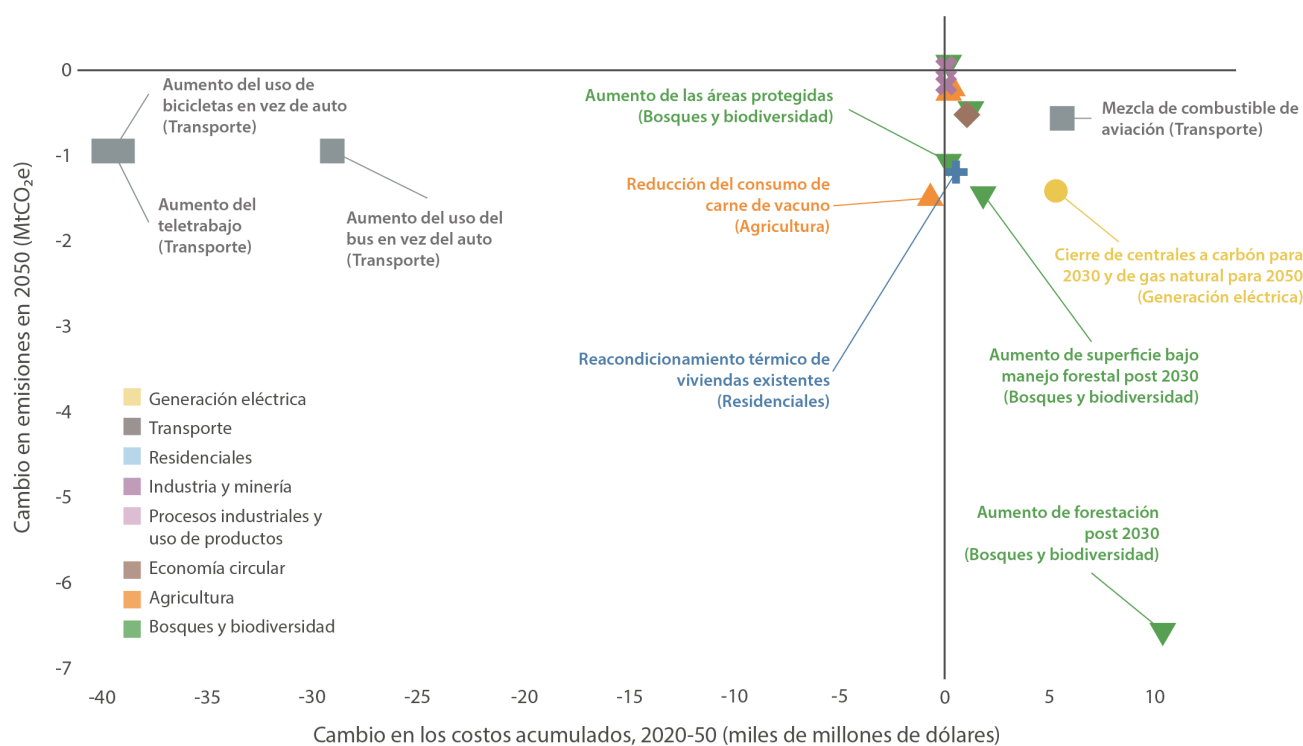
2. Acciones con costo cercano a cero, pero con un impacto marginal sustancial en la reducción de emisiones, como el aumento de las áreas protegidas, la reducción del consumo de carne vacuna, el reacondicionamiento térmico de las viviendas existentes y el incremento de la superficie bajo manejo forestal post 2030.

3. Acciones con un mayor costo marginal respecto de su capacidad para reducir emisiones, como la mezcla de combustibles en la aviación y cambiar el calendario de cierre de las centrales de carbón.

4. Acciones de alto impacto de reducción de emisiones y alto costo, como el aumento de forestación post 2030.

Gráfico 4.17:

Diagrama de dispersión del cambio en las emisiones netas para 2050 por costos del sector



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La estimación de costo-impacto se realizó de manera individual para cada medida. El cambio en emisiones se estima en MtCO₂e en 2050; el cambio en costos se estima en millones de dólares sin descontar.

De acuerdo con el gráfico 4.17, varias de las opciones analizadas en la NDC+ reducen las emisiones en 2050 y, al mismo tiempo, disminuyen los costos de implementación. Si se asume que no existen retos de implementación, debería procurarse la puesta en marcha de estas acciones, independientemente de condiciones futuras. Para explorar las implicaciones de costo-beneficio de manera más amplia se definen variaciones de la estrategia NDC+ a través de diferentes combinaciones de las acciones que se hallan en el gráfico 4.16.

El gráfico 4.18 muestra las cuatro variaciones de la estrategia NDC+ de este estudio. La estrategia Robusta A considera todas las acciones dentro de la NDC original, y adiciona todas las acciones incluidas en el gráfico 4.17,

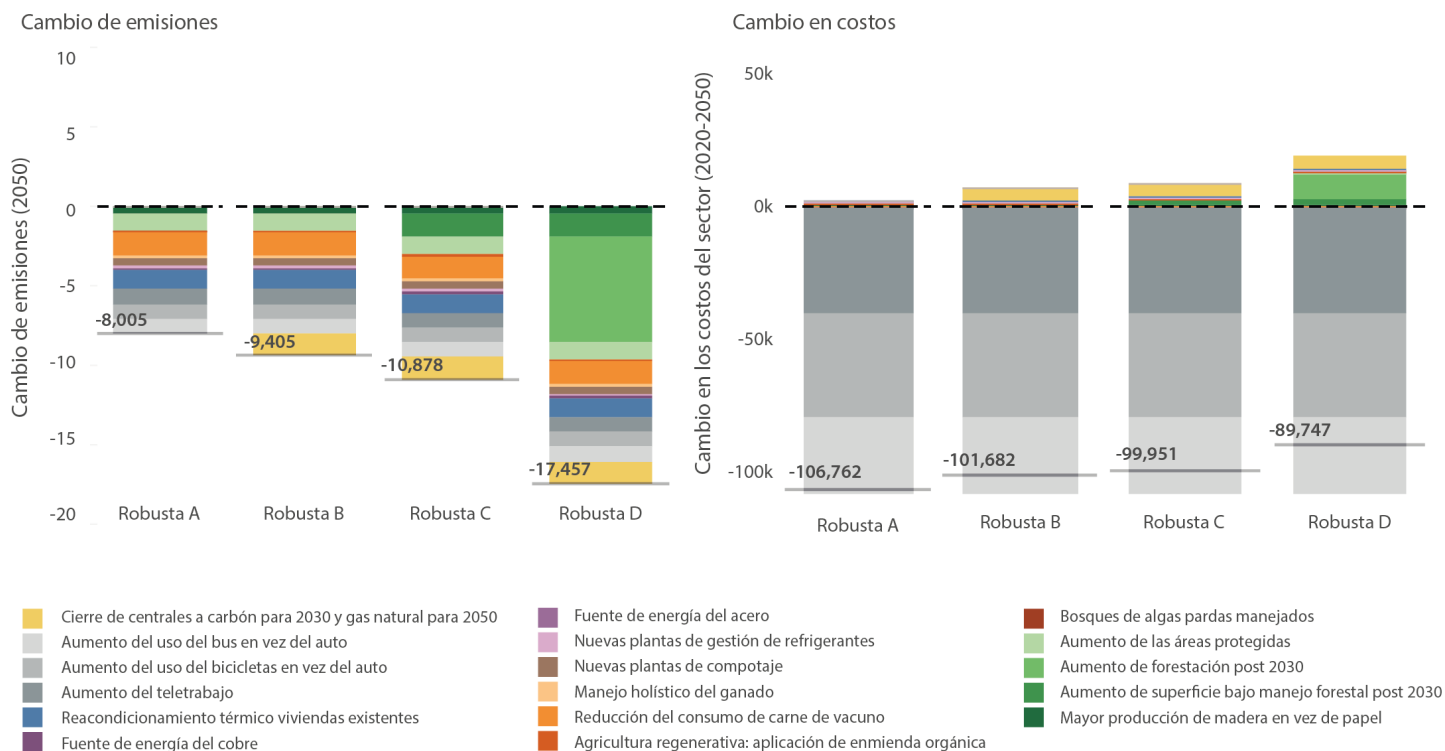
excepto aquellas que resultan en mayores costos:

- Cierre de centrales de carbón para 2030 y gas natural para 2050.
- Aumento de la superficie bajo manejo forestal post 2030.
- Aumento de forestación post 2030.
- Mezcla de combustible de aviación.

El resto de las estrategias (Robusta B, Robusta C, Robusta D) agregan de manera incremental cada uno de los elementos de mayor costo, de forma tal que cada variación representa un escalonamiento desde la estrategia NDC original hasta la estrategia NDC+. La estrategia NDC+ es equivalente a adicionar todos los elementos de mayor costo.

Gráfico 4.18:

Cambio estimado en las emisiones y cambio en los costos, en comparación con la estrategia NDC, para las cuatro alternativas robustas



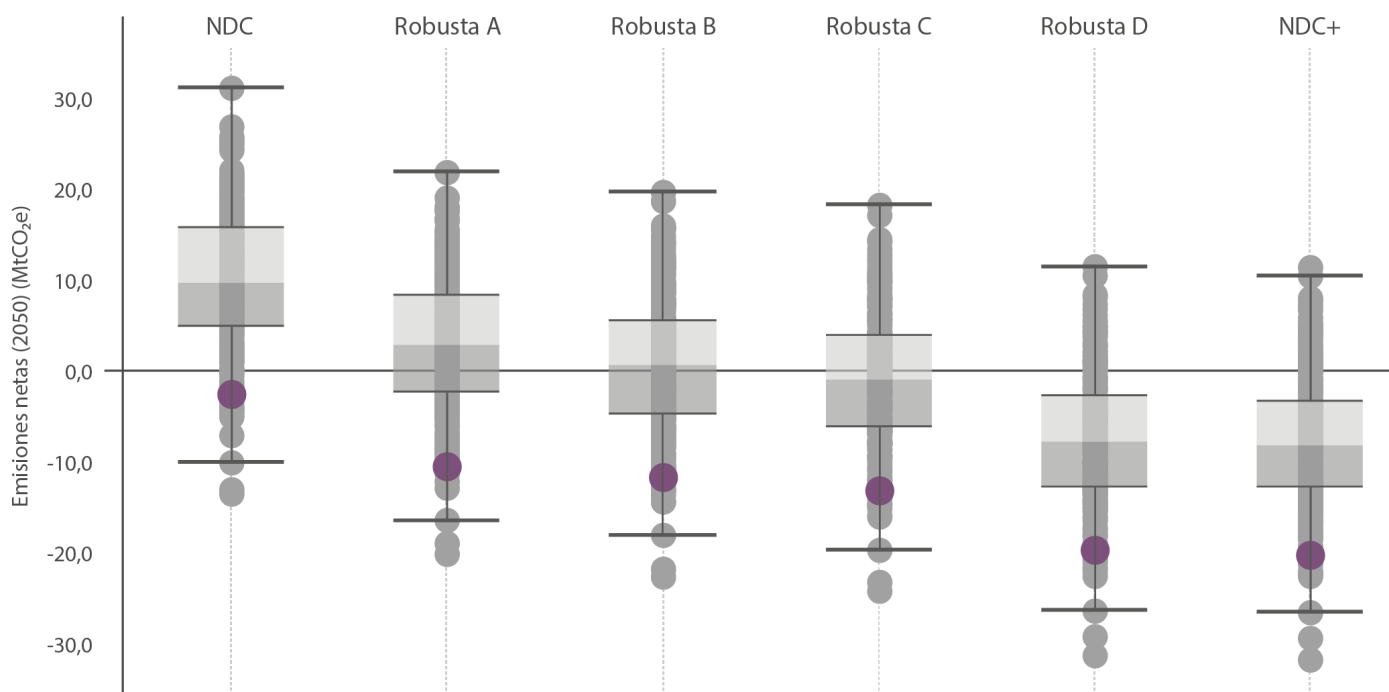
Fuente: Elaboración propia.

Asumiendo que los efectos de las acciones son aditivos y lineales, el [gráfico 4.18](#) muestra que, considerando el futuro de referencia, la estrategia Robusta A reduciría las emisiones en 8 MtCO₂eq respecto de la NDC original, y al mismo tiempo resultaría en ahorros sustanciales en el sector transporte. La estrategia Robusta B reduciría las emisiones en 1,5 MtCO₂eq adicionales y disminuiría también los costos de la estrategia gracias al adelanto en el cierre de las plantas de carbón. Las estrategias Robusta C y Robusta D muestran una capacidad mayor de reducción de emisiones debido a mayores acciones en el sector forestal, pero también resultan en mayores costos.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de estas alternativas bajo incertidumbre, se ha evaluado su desempeño bajo el ensamble de 1.000 futuros considerados en este estudio. El [gráfico 4.19](#) refleja estos resultados respecto de las emisiones netas alcanzadas en 2050 (eje vertical) para cada una de las estrategias (eje horizontal). La robustez de la estrategia (i.e., porcentaje de futuros en los que se cumple la meta de carbono-neutralidad) incrementa de manera gradual para cada una de las expansiones de la estrategia NDC original, hasta llegar a la estrategia NDC+.

Gráfico 4.19:

Emisiones en 2050 en 1.000 futuros para las estrategias NDC, robustas A-D y NDC+



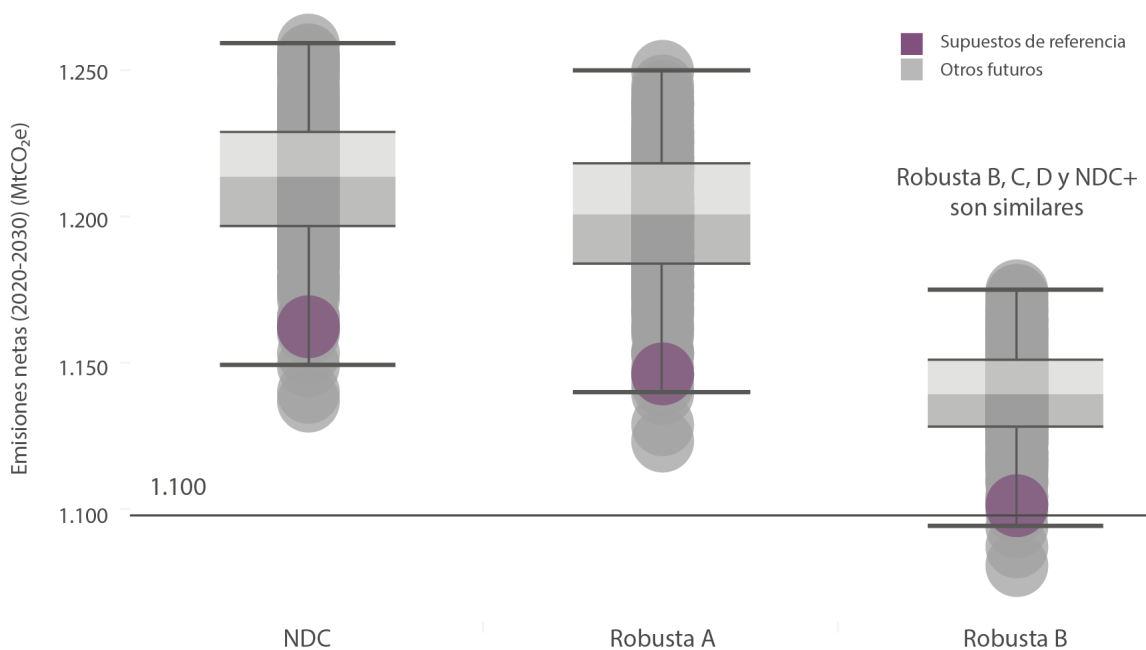
Fuente: Elaboración propia.

También se comparó el desempeño de estas estrategias con respecto a los objetivos de reducción de emisiones de corto plazo (i.e., 2030). El gráfico 4.20 presenta el desempeño de las alternativas analizadas, pero en esta ocasión tomando como referencia el objetivo de reducción de emisiones de 2020 a 2030 (i.e., eje vertical). Los resultados muestran la importancia de adelantar la salida de centrales de carbón, incluida en Robusta B, C y D, pero no en Robusta A, para alcanzar los objetivos de

presupuesto de carbono hacia 2030, ya que todas las estrategias analizadas, excepto la Robusta A, pueden cumplir con ese objetivo de corto plazo bajo el futuro de referencia. Sin embargo, cabe resaltar que, si las condiciones del futuro se vuelven menos favorables en una proporción significativa de los futuros analizados, las estrategias estudiadas no cumplen con el objetivo de reducción de emisiones de corto plazo.

Gráfico 4.20:

Presupuesto de carbono (emisiones totales de 2020 a 2030) para supuestos de referencia y en 1.000 futuros para las estrategias NDC, Robusta A y Robusta B

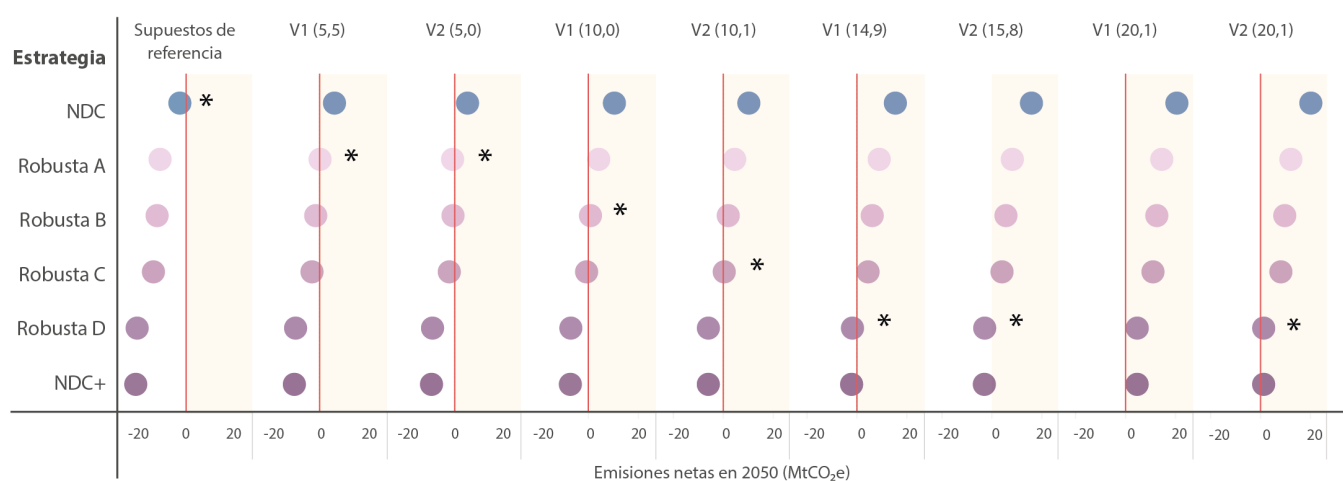


Fuente: Elaboración propia.

En análisis de desempeño de la estrategia NDC+ y sus alternativas sugiere que todas estas estrategias resultan en menores emisiones netas en 2050. Sin embargo, estos resultados muestran también que el nivel de inversión requerido para alcanzar estas metas de reducción de emisiones depende de cómo se desenvuelven en el futuro

los factores de incertidumbre considerados. El gráfico 4.21 ilustra este punto: el eje vertical denota cada una de las estrategias consideradas en el estudio, el eje horizontal indica las emisiones netas en 2050 y cada columna señala cada uno de los futuros empleados como referencia en el análisis de vulnerabilidad (i.e., vulnerabilidades V1 y V2).

Gráfico 4.21:
Cambio en emisiones estimadas, en comparación con la estrategia NDC, para las cuatro alternativas robustas y NDC+ para futuros seleccionados



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El asterisco indica la estrategia menos agresiva requerida para cumplir con la meta de cero emisiones netas para 2050.

Los resultados indican que para los futuros en los que se alcanzan emisiones netas de 5 MtCO₂eq en 2050 (columnas 2 y 3) bajo la NDC, la estrategia alternativa Robusta A es la que se acerca más al objetivo de carbono-neutralidad en dicho año, sin llegar a un grado de reducción de emisiones adicional innecesario. Para los futuros en los cuales la estrategia NDC resulta en 10 MtCO₂eq en 2050 (columnas 4 y 5), las estrategias Robusta B y Robusta C son las menos agresivas para alcanzar la carbono-neutralidad. De manera similar, para los futuros en los que la estrategia NDC resulta en 15 MtCO₂eq, la estrategia Robusta D es la que cumple el objetivo de carbono-neutralidad de manera más eficiente. Finalmente, para los futuros que resultan en 20 MtCO₂eq en 2050 (columnas 8 y 9), la estrategia Robusta D es suficiente para alcanzar la carbono-neutralidad bajo la vulnerabilidad V2,

pero no bajo la vulnerabilidad V1. Esta diferencia es resultado de las diferencias de estos dos futuros bajo V1 y V2. La V1 describe futuros que resultan en emisiones altas, resultado de factores en el sector forestal. Estos factores hacen que las acciones forestales adicionales implementadas en las estrategias Robusta C y Robusta D sean menos efectivas en esos futuros vis-à-vis futuros que resultan en niveles de reducción de emisiones similares, pero ocasionadas por otros factores que no están relacionados con el sector forestal. Cabe notar el cambio marginal nulo entre la estrategia Robusta D y la NDC+, lo que indica que la acción “mezcla de combustibles en aviación” provee pocos beneficios de reducción de emisiones e incrementa significativamente los costos de la estrategia.

4.7 Análisis macroeconómico

Una vez estimados los distintos futuros de emisiones a través de los modelos sectoriales usando como insumos parámetros e incertidumbre bajo los objetivos de carbono-neutralidad, estos modelos sectoriales proveen dos insumos importantes para estimar el comportamiento macroeconómico¹² de la economía: 1) costos en activo físico (inversión) y 2) costos de operación para cada sector y cada futuro aprovechando el rango de incertidumbre construido.

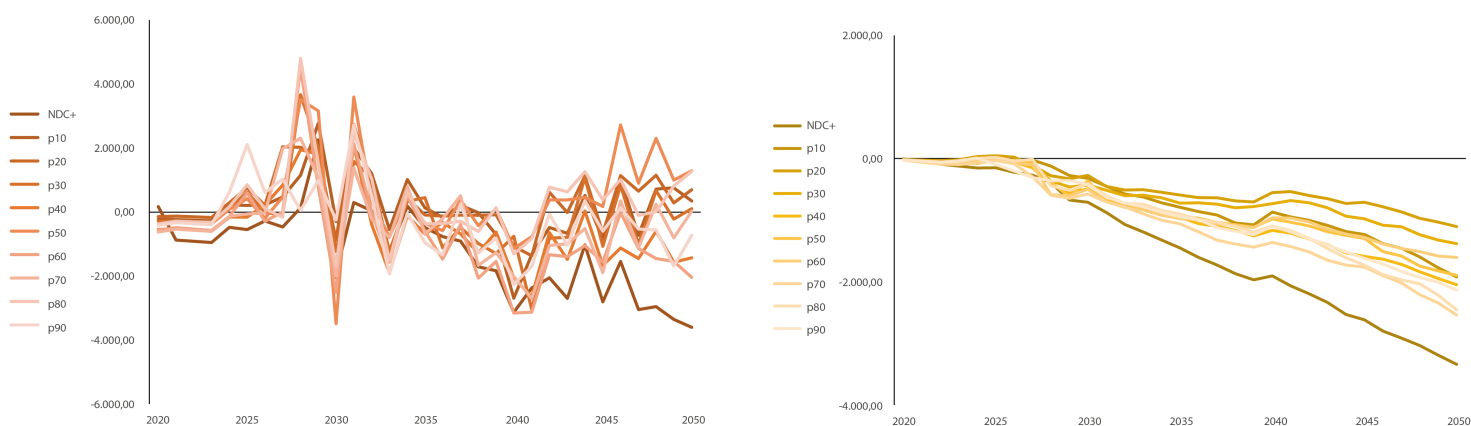
La estrategia de estimación parte del supuesto de que la senda en la que Chile transita corresponde a la última actualización de la NDC, la cual, además de ofrecer una actualización con respecto al primer compromiso, traza un camino para 2030 con miras a la carbono-neutralidad en 2050.

Luego, sobre este escenario, se obtiene el paquete de robustecimiento de medidas para la reducción de incertidumbres de cumplimiento de la carbono-neutralidad (NDC+) y sus consecuentes sensibilidades en percentiles de los futuros posibles de emisiones.

En el **gráfico 4.22** aparecen las trayectorias de la diferencia en gastos de inversión y operación entre la alternativa de medidas NDC+ y NDC, junto a las asociadas en los percentiles de emisiones, generados por combinaciones de parámetros y variables de la NDC+.

Gráfico 4.22:

Trayectoria de gastos de inversión y operación asociados al paquete NDC+ y percentiles entre 2020 y 2050



Fuente: Elaboración propia.

¹² Las variables analizadas corresponden a la demanda agregada: consumo privado, inversión total (pública más privada), gasto del gobierno, exportaciones e importaciones, así como también la desagregación del valor agregado por actividad económica.

Asimismo, se pueden analizar estas trayectorias evaluadas a valor presente con la tasa de descuento del 6% utilizada en la evaluación de proyectos de Chile por sector, como se presenta en el [cuadro 4.2](#). El paquete NDC+ tiene un valor presente menor en inversión de capital fijo de US\$11.536 millones, mientras que los gastos de operación

constituyen un menor gasto de US\$13.026 millones, ambos con respecto a la alternativa de NDC. Este menor gasto se explica gracias al ahorro en las medidas transporte y un incremento del gasto en el sector de bosque y biodiversidad.

Cuadro 4.2:

Gasto en inversión y operación por sector entre 2020 a 2050 descontados al 6% del plan NDC+ (en millones de dólares)

| | CAPEX | | | OPEX | | |
|------------------------------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | min | NDC+ | max | min | NDC+ | max |
| Bosques y biodiversidad | 2.931,9 | 3.271,1 | 3.508,3 | 455,3 | 483,8 | 522,5 |
| Agricultura | 12,0 | 12,9 | 14,0 | -237,8 | -140,2 | -86,5 |
| Economía circular | 107,2 | 107,4 | 108,4 | 96,7 | 96,7 | 96,7 |
| Procesos industriales y uso de productos | 0,6 | 1,1 | 1,2 | 2,7 | 4,5 | 4,8 |
| Industria y minería | 28,6 | 76,0 | 176,3 | -60,5 | -60,5 | 7,7 |
| Residenciales | 3.351,1 | 8.259,0 | 8.259,0 | -3.907,2 | -3.907,2 | -1.728,8 |
| Transporte | -24.381,1 | -24.381,1 | -5.813,3 | -9.138,8 | -9.138,8 | -2.107,9 |
| Generación eléctrica | 1.117,7 | 1.117,7 | 3.895,1 | -1.786,8 | -364,5 | -245,7 |
| Total | -11.536,0 | -11.536,0 | 4.930,0 | -13.026,2 | -13.026,2 | -4.451,6 |

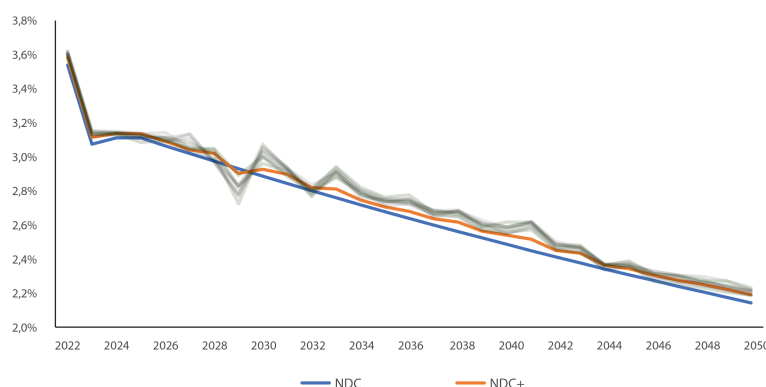
Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos de entrada, obtenidos de la simulación de los modelos sectoriales, se trabaja sobre la base de Antosiewicz et al. (2020) y del modelo MEMO (véase el capítulo 4) para obtener el rango de impacto en la producción de la economía recogida en la variación del PIB.

El [gráfico 4.23](#) permite constatar que, de un escenario de referencia donde la NDC está en ejecución y con una tasa de variación anual promedio del PIB del 2,5% para el periodo 2020-50, la implementación de la NDC+ provocaría una ganancia adicional de 0,06 puntos porcentuales en promedio, en un rango de 0,04 a 0,07 puntos porcentuales por año.

Gráfico 4.23:

Tasa de variación anual del PIB del escenario de referencia (NDC) y NDC+



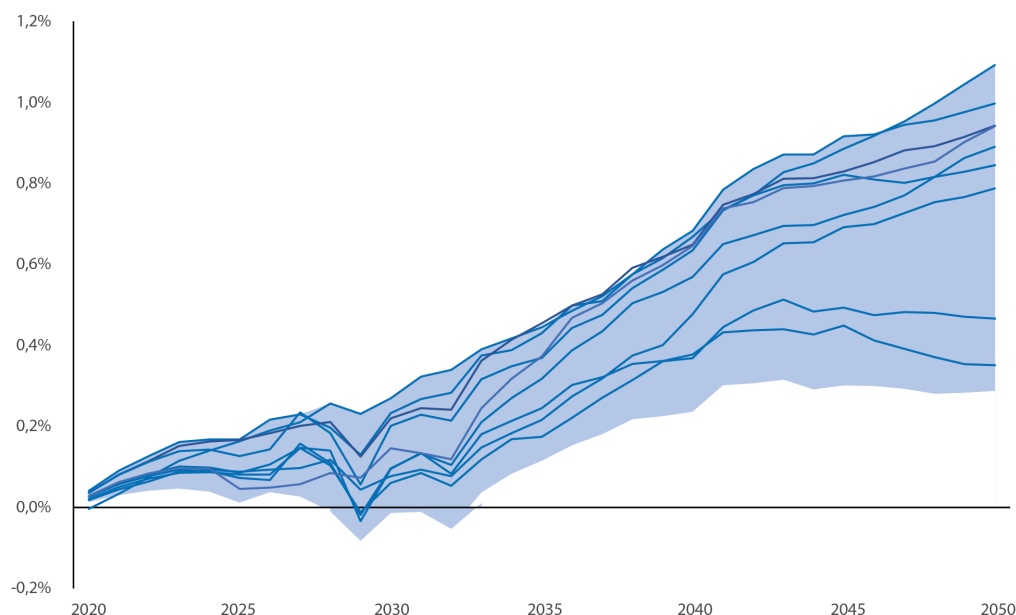
Fuente: Elaboración propia.

Para entender el aporte de estos puntos adicionales de crecimiento por año del paquete NDC+, vale analizar el impacto en el nivel del producto al cabo de 30 años de implementadas las medidas. En el gráfico 4.24 el nivel del PIB para 2050 puede expandirse en un rango de entre el

0,3% y el 1,1%, en cuyo caso el escenario de NDC+ logra el nivel superior del rango. Esto representa un incremento anual de US\$66 millones y US\$243 millones por año hasta el fin del periodo, que explican entre US\$1.989 millones y US\$7.293 millones adicionales en 2050.

Gráfico 4.24:

Porcentaje de variación del nivel de producto por implementación de la NDC+ y percentiles



Fuente: Elaboración propia.

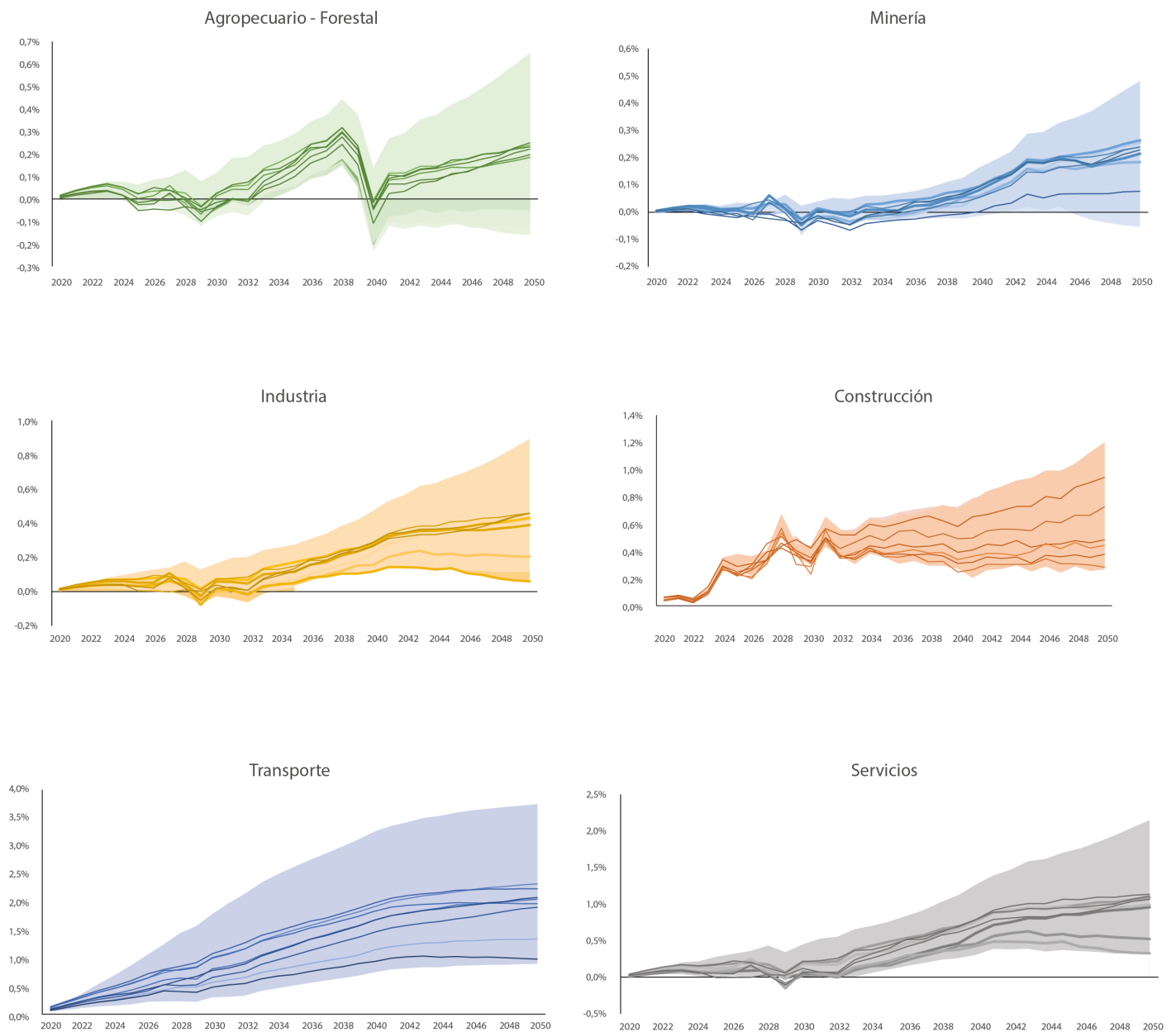
La estructura ampliada del modelo de equilibrio general permite observar el comportamiento por actividades económicas de la implementación de la NDC+ y sus variantes con respecto a la senda NDC (gráfico 4.25). En todos los sectores se ve el esfuerzo de llegar al cumplimiento de las metas intermedias trazadas para 2030, y por consiguiente la aceleración de las salidas de plantas de generación de carbón y el incremento de la inversión en medidas de reforestación y biodiversidad, lo cual provoca contracciones en el nivel de producto en los años en torno a 2030 en cuatro actividades (agropecuario-forestal, minería, industria y servicios). Al analizar los paneles con impactos en las seis actividades del gráfico 4.25, se pueden identificar dos grupos: i) compuesto por los sectores agropecuario-forestal, minería, industria y servicios; ii) integrado por construcción y transporte.

En el primer grupo, las actividades registran contracciones en la trayectoria de inversiones para 2050. El sector agropecuario-forestal (panel [a]) tiene la dinámica del rango de impacto en el nivel del producto de entre -0,2% y 0,6% en 2050; la minería (panel [b]) ostenta un rango de variación de entre -0,1% y 0,5%; la industria (panel [c]), entre 0,1% y 0,9% y los servicios (panel [f]), entre 0,3% y 2,1%.

En el segundo grupo, construcción (panel [d]) y transporte (panel [e]) tienen una trayectoria positiva y logran los rangos más altos de aumento en el nivel de producto de sus actividades, con rangos de entre 0,3%-1,2% y 0,9%-3,7% respectivamente.

Este análisis permite comprender la necesidad del gradualismo, ya que medidas de implementación de shock o de una vez pueden conducir a pérdidas significativas tanto en el producto sectorial como en el agregado.

Gráfico 4.25:
Porcentaje de variación del nivel de producto por implementación de la NDC+ y percentiles, por sector



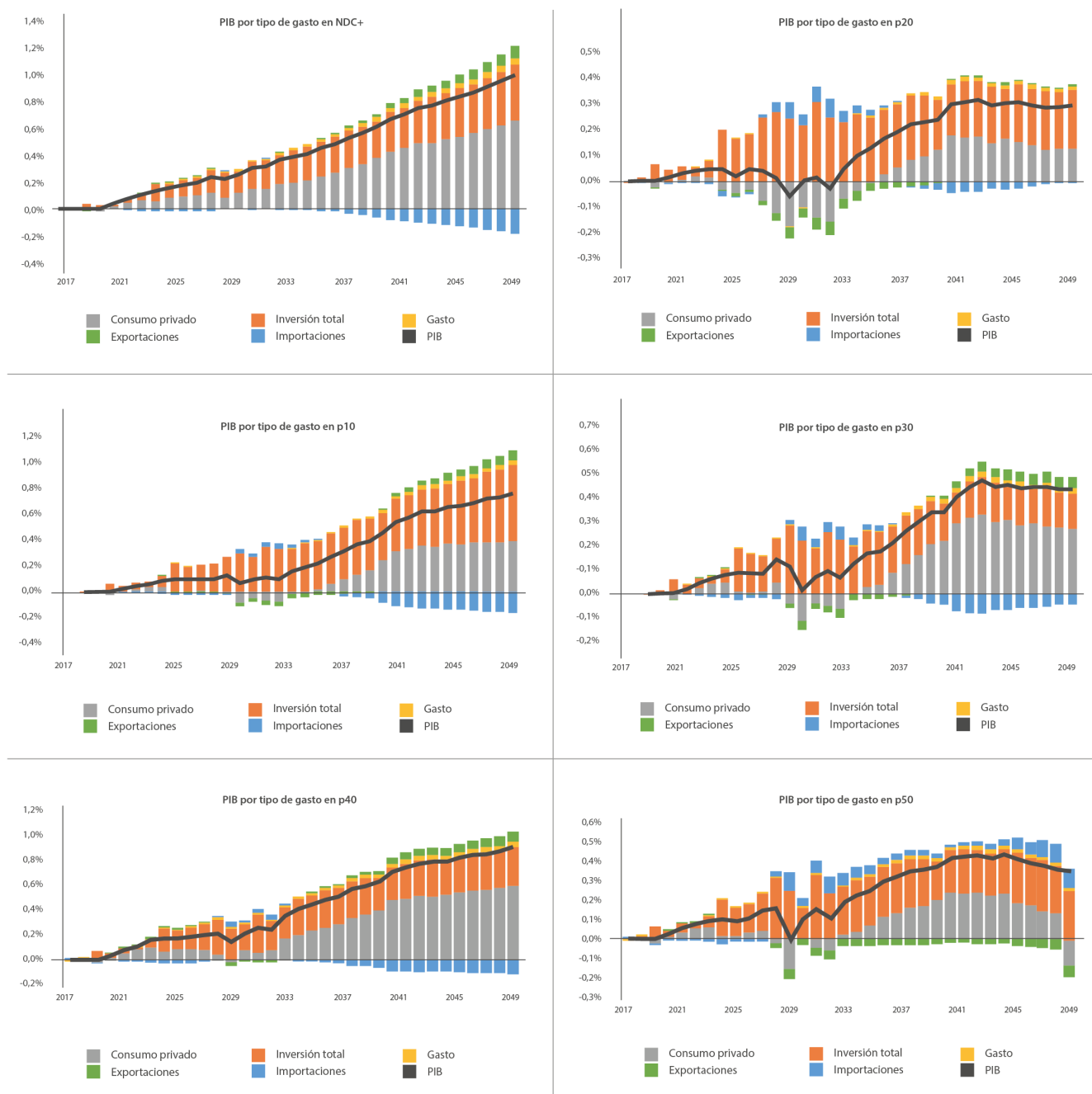
Fuente: Elaboración propia.

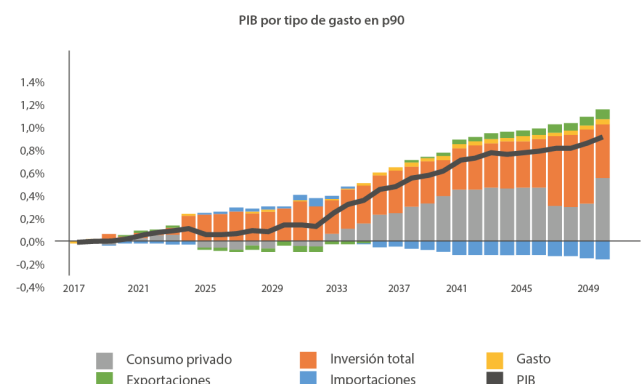
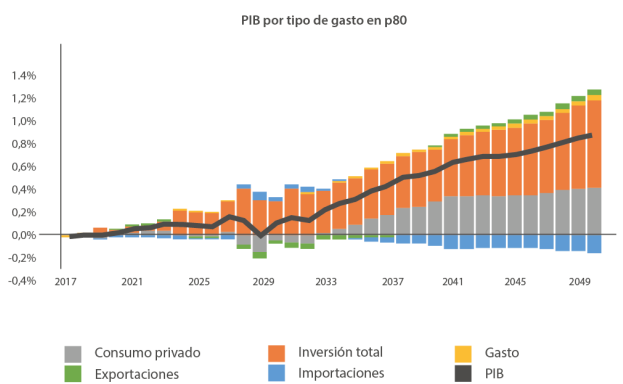
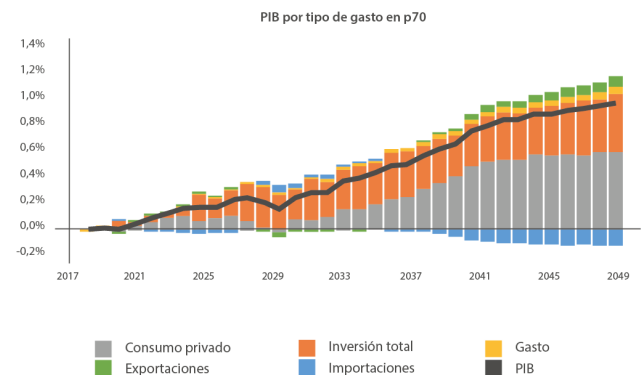
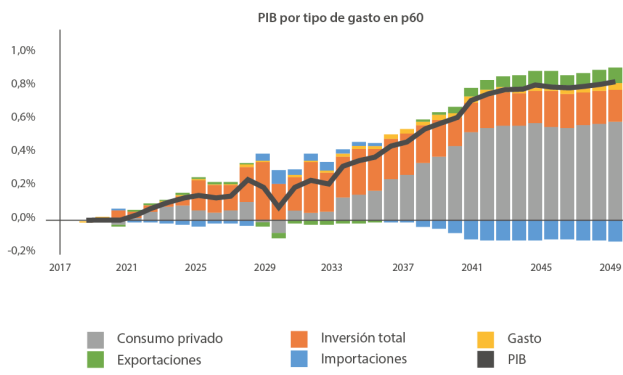
Otra forma de analizar los resultados del modelo consiste en considerar la contribución de los componentes de la demanda agregada: consumo de los hogares, inversión total (pública y privada), gasto público y consumo externo (exportaciones e importaciones).

Al dividir el análisis en cada uno de los percentiles de emisiones seleccionados y el escenario de referencia de la NDC+, se obtiene la contribución dominante del consumo privado y la inversión en todos los escenarios, cuya incidencia cambia a causa de los planes específicos en cada situación (gráfico 4.26).

Gráfico 4.26:

Porcentaje de variación del nivel de producto por implementación de la NDC+ y percentiles, PIB por tipo de gasto





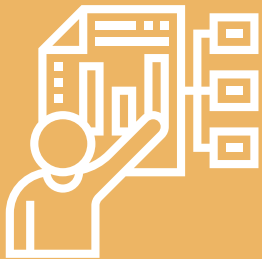
Fuente: Elaboración propia.

En promedio, los niveles de las variables tienen una variación anual en los siguientes rangos: consumo privado (de los hogares), entre 0,05% y 0,55%; inversión privada, entre 0,36% y 0,85%; gasto, entre 0,04% y 0,14%, mientras que las exportaciones netas se encuentran en equilibrio, vale decir, el crecimiento de las exportaciones se compensa con importaciones.

Cabe resaltar que, en los episodios donde se registran caídas en el nivel del producto entre 2029 y 2032, las variables más afectadas son consumo de los hogares y exportaciones.



5 **Conclusiones y** **recomendaciones**



Este estudio emplea un modelo integrado de evaluación para estimar trayectorias de emisiones y costos de reducción de emisiones, considerando los sectores más relevantes de la economía de Chile bajo un amplio espectro de incertidumbre.

Bajo la extrapolación de las condiciones actuales, la estrategia de carbono-neutralidad incluida en la contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) cumpliría con el objetivo de carbono-neutralidad en 2050, pero excedería el presupuesto de carbono de corto plazo planteado hacia 2030.¹³

Se toma en cuenta el desempeño de la NDC bajo más de 1.000 futuros alternativos, que consideran de manera simultánea la incertidumbre asociada con un amplio conjunto de factores ambientales, económicos y tecnológicos, así como la incertidumbre asociada al desempeño mismo de varias de las acciones incluidas en la NDC.

Al analizar el desempeño de la NDC bajo ese ensamble de futuros respecto de la meta de carbono-neutralidad en 2050, se identificaron dos condiciones clave bajo las cuales la NDC no cumpliría con la meta de carbono neutralidad (i.e., emisiones netas en 2050 mayores a 5 MtCO₂eq en 2050). La primera condición resulta de la combinación de tres factores: 1) altas cosechas forestales, 2) bajo rendimiento de bosques nativos y plantaciones forestales, y 3) baja penetración de la electromovilidad en el sector transporte. Para la segunda, entran en juego tres factores adicionales: 1) menores tasas de penetración de energías alternativas en el sector eléctrico (resultado de costos más altos de la energía termosolar de concentración), 2) mayores emisiones del sector minero (resultado de mayores niveles de producción y menor eficiencia energética), y 3) baja conversión del transporte de carga hacia el hidrógeno.

¹³ Algunas medidas de bajo impacto en mitigación no fueron consideradas en el estudio debido a falta de información o limitaciones de modelación. Sin embargo, la exclusión de estas medidas no afecta de manera sustancial los resultados del estudio.

Para poder mitigar estas vulnerabilidades, es necesario expandir la NDC original. Con esa finalidad, se consideraron acciones que en su conjunto reducen, en promedio, las emisiones netas en 18 MtCO₂eq respecto de la NDC original. Estas alternativas se denominaron Robusta A, Robusta B, Robusta C y Robusta D, y se definieron de manera ordinal en función del número de acciones adicionales que incluyen. Además de analizar el desempeño en términos de su capacidad de mitigación, para cada una de estas estrategias se estimaron los costos adicionales (o ahorros) incurridos en la expansión de la estrategia original.

El análisis del conjunto de estrategias robustas consideradas sugiere lo siguiente:

La NDC debe fortalecerse mediante el retiro acelerado de las centrales eléctricas de carbón para lograr los objetivos de NDC a corto plazo. Esto requiere la adopción de al menos la estrategia Robusta B. Cabe destacar que, además, esta estrategia genera ahorros de costos, en particular gracias a las acciones de cambio modal en el sector transporte.

Para mejorar el desempeño de la NDC en una gama más amplia de condiciones futuras, se requieren acciones adicionales en el sector forestal, incluidas las de las estrategias Robustas C y D. Específicamente, aumento de la forestación e incremento de las áreas protegidas.

El número de acciones de reducción de emisiones adicionales necesarias en el sector forestal dependerá de cómo evolucionen las tendencias y cuán exitosas sean otras acciones de reducción de emisiones incluidas en la NDC. En particular, este análisis sugiere que hay una amplia gama de acciones que pueden implementarse para garantizar que la NDC se mantenga en la trayectoria para lograr los objetivos de reducción de emisiones de corto y largo plazo.

Los resultados sectoriales muestran que las emisiones del sector energía podrían hasta duplicarse en caso de que no se cumplan las metas que se han supuesto en la NDC. Varias medidas que tienen un nivel de maduración bajo en el país, como la electromovilidad o el hidrógeno en el sector transporte, los sistemas solares térmicos, o la electrificación de camiones, son claves para reducir las emisiones. Alcanzar las metas impuestas en la NDC requerirá políticas públicas que hagan masivo el desarrollo de dichas medidas en el corto plazo. Asimismo, reducir las

emisiones del sector residencial depende fuertemente de los supuestos de electrificación y de la introducción de sistemas solares térmicos, sistemas cuyo nivel de maduración a nivel nacional también es escaso.

Por su parte, en virtud de la Enmienda de Kigali, el sector de procesos industriales y uso de productos presenta un rango menor de incertidumbre asociado a 2050, que resulta en una reducción importante de las emisiones. Sin embargo, existe un nivel de incertidumbre significativo en la trayectoria de las emisiones hacia 2030, lo que podría ser relevante en el caso de compromisos en el mediano plazo.

El sector residuos presenta incertidumbres destacadas, asociadas a las trayectorias de generación y composición de los residuos domiciliarios, así como a la eficiencia de los sistemas de captura de metano en rellenos sanitarios. Medidas complementarias para evitar que los residuos orgánicos terminen en los sitios de disposición final pueden reducir el rango de incertidumbre.

En el sector agricultura, las mayores incertidumbres están asociadas al precio de la carne y del maíz. A esto hay que agregar la incertidumbre ligada a la implementación de los biodigestores en planteles porcinos, en relación con la estrategia NDC+, con la posibilidad de generar reducciones significativas en sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), adicionales a la estrategia NDC. La puesta en marcha de estas medidas genera beneficios netos, pero requiere inversiones, en algunos casos reducciones de la productividad en el corto plazo y cambios en las prácticas, por lo que será necesario contar con apoyo técnico y financiero para realizar estas acciones.

En el sector de bosques y biodiversidad, las incertidumbres de mayor impacto en las emisiones de GEI están asociadas a la frecuencia de las cosechas forestales, el rendimiento de bosques y plantaciones, la variación de la demanda de leña y los incendios forestales. Este sector es clave para alcanzar la carbono-neutralidad, dado su tamaño relativo a 2050, el cual debe ser mayor o igual a todos los otros sectores juntos. Esto se podría alcanzar gracias a que el sector tiene capturas netas y al alto potencial para implementar medidas adicionales a la estrategia NDC (~10 Mton CO₂eq/año para 2050). Para lograrlo, se deben extender las medidas de forestación y de manejo forestal, pero también llevar adelante nuevas acciones, especialmente soluciones basadas en la naturaleza, las cuales –junto con la reducción de emisiones– generan múltiples co-beneficios, aunque para su realización dependen de fuertes incentivos económicos.

Un punto fundamental, que no fue tratado en el presente estudio y que requiere mayor discusión, es el relacionado con el diseño, la efectividad y los plazos de implementación de las políticas públicas necesarias para que las medidas de reducción de emisiones evaluadas sucedan a la escala requerida. Esta es una preocupación transversal en todos los sectores, pero es particularmente significativa para bosques y biodiversidad. Considérese, a modo de ejemplo, que los incendios forestales aparecen como un riesgo acotado al evaluar la estrategia NDC, pese a que la última década ha sufrido un incremento de este tipo de eventos. Esto se debe a que el modelo considera la implementación de la acción “Disminución de la degradación de bosque nativo y plantaciones por incendios forestales”, que reduce la superficie afectada por incendios. Para abordar este tipo de cuestiones, se debe tomar una serie de medidas que tienen un costo privado mayor al beneficio privado (no al social), por lo que esto se debe corregir mediante regulación. Por lo tanto, si bien es posible y deseable implementar las transformaciones necesarias para alcanzar la carbono-neutralidad, este trabajo no plantea las dificultades asociadas al diseño ni a la ejecución de las políticas públicas y acciones indispensables, que –de realizarse de una manera adecuada– generarán importantes beneficios sociales, económicos y ambientales para el país.

En cuanto a las lecciones aprendidas desde la perspectiva del impacto macroeconómico, al analizar los componentes de demanda agregada y producto sectorial, se observa que en promedio la implementación de una NDC más robusta conllevaría un incremento en la tasa de crecimiento anual del producto interno bruto (PIB) de 0,06 puntos porcentuales por encima de la estrategia NDC, lo que llevaría a un PIB mayor en un 0,8% en promedio en 2050 con respecto a la NDC, con el gasto en medidas de CAPEX y OPEX menores a la NDC en US\$1.031 millones y US\$7.918 millones, en promedio, respectivamente. Estos resultados deben interpretarse en el contexto de una economía en la cual la regulación de normas de precio y normas de comando y control es la del año base de referencia de calibración. Quedan pendientes de análisis las posibles pérdidas o ganancias derivadas de cambios regulatorios que no han sido incorporados en el ejercicio. Finalmente, también se resalta la necesidad de que las medidas de reducción de emisiones sean introducidas de forma gradual, ya que el ejercicio develó la existencia de un conjunto de combinaciones que producen significativas caídas del producto agregado y sectorial.



Referencias

-
- Antosiewicz, M., L. E. Gonzáles Carrasco, P. Lewandowski y N. de la Maza Greene. 2020. Green Growth Opportunities for the Decarbonization Goal for Chile: Report on the Macroeconomic Effects of Implementing Climate Change Mitigation Policies in Chile 2020. Washington, D.C.: Banco Mundial. Disponible en <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34575>.
- Antosiewicz, M. y P. Kowal. 2016. MEMO III - A large scale multi-sector DSGE model. IBS Research Report 02/2016. Disponible en <http://ibs.org.pl/en/publications/memo-iii-a-large-scale-dsge-model/>.
- Banco Mundial. 2018. What a Waste 2.0 - A global snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, D.C.: Banco Mundial. Disponible en <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo) y DDPLAC (Rutas de Descarbonización Profunda en Latinoamérica y el Caribe). 2019. Cómo llegar a cero emisiones netas: lecciones de América Latina y el Caribe. Washington, D.C.: BID.
- Bryant, B. P. y R. J. Lempert. 2010. Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1): 34-49.
- Centro de Energía. 2019. Desarrollo de una herramienta de modelamiento y simulación de políticas climáticas. Santiago de Chile: Centro de Energía.
- . 2020. Estudio de actualización y complementación de herramientas de prospectivas de largo plazo asociadas a la demanda energética. Santiago de Chile: Centro de Energía. Disponible en <http://centroenergia.cl/archivos/estudio-de-actualizacion-y-complementacion-de-herramientas-de-prospectivas-de-largo-plazo-asociadas-a-la-demanda-energetica/>.
- Centro de Energía Universidad de Chile, Centro Cambio Global UC, CLAPES UC, Corporación RAND y BID. 2020. Evaluación de las opciones para fundamentar el diseño de una estrategia a largo plazo para lograr la neutralidad en carbono para 2050 en Chile en condiciones de incertidumbre: Informe Etapa I. Washington, D.C.: BID.
- Fischbach, J. R., R. J. Lempert, E. Molina-Pérez, A. A. Tariq, M. L. Finucane y F. Hoss. 2015. Managing Water Quality in the Face of Uncertainty. Santa Mónica, CA: Corporación RAND.
- Gobierno de Chile. 2020. Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile. Actualización 2020. Santiago de Chile: Gobierno de Chile. Disponible en <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=NDC+Chile>.
- Gobierno de Chile. 2021. Estrategia Climática de Largo Plazo. Santiago de Chile: Gobierno de Chile. Disponible en <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/>.
- Groves, D. G., N. Kalra, J. Syme, E. Molina-Pérez y Ch. Garber. 2021. Water Planning for the Uncertain Future: An Interactive Guide to the Use of Methods for Decision-making Under Deep Uncertainty (DMDU) for U.S. Bureau of Reclamation Water Resources Planning. Santa Mónica, CA: Rand Corporation. Disponible en <https://www.rand.org/pubs/tools/TL320.html>.
- Groves, D. G. y R. J. Lempert. 2007. A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change*, 17(1): 73-85.
- Höglund-Isaksson, L., P. Purohit, M. Amann, I. Bertok, P. Rafaj, W. Schöpp y J. Borken-Kleefeld. 2017. Cost estimates of the Kigali Amendment to phase-down hydrofluorocarbons. *Environmental Science and Policy*, 75: 138-147. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.05.006>.
- Holappa, L. A. 2020. General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry. *Metals*, 2020(10): 1117.

- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Preparado para el National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa: IGES. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- . 2018. Summary for Policymakers. In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Ginebra: IPCC.
- Kalra, N., D. G. Groves, L. Bonzanigo, E. Molina-Pérez, C. Ramos, C. Brandon e I Rodríguez Cabanillas (2014). Robust decision-making in the water sector: a strategy for implementing Lima's long-term water resources master plan. Washington, D.C.: Banco Mundial. Disponible en <https://documents1.worldbank.org/curated/en/617161468187788705/pdf/WPS7439.pdf>.
- Lempert, R. y N. Kalra. 2011. *Managing climate risks in developing countries with robust decision making*. Washington, D.C.: World Resources Institute.
- Lempert, R., S. Popper y S. Bankes. 2003. *Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis*. Santa Mónica, CA: Corporación Rand.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2018. *Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile, serie 1990-2016*. Santiago de Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
- Molina-Pérez, E., D. G. Groves, S. W. Popper, A. I. Ramírez y R. Crespo-Elizondo. 2019. *Developing a Robust Water Strategy for Monterrey, Mexico: Diversification and adaptation for coping with climate, economic, and technological uncertainties*. Santa Mónica, CA: Corporación RAND.
- National Research Council. 2009. *Science and decisions: advancing risk assessment*. Washington, D.C.: National Research Council.
- Palma Behnke R., C. Barría, K. Basoa, D. Benavente, C. Benavides, B. Campos, N. de la Maza, L. Farías et al. 2019. *Chilean NDC Mitigation Proposal: Methodological Approach and Supporting Ambition*. Mitigation and Energy Working Group Report. Santiago de Chile: COP25, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Purohit, P. y L. Höglund-Isaksson. 2017. Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005-2050 with abatement potentials and costs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4): 2795-2816. Disponible en <https://doi.org/10.5194/acp-17-2795-2017>.
- Quirós-Tortós, J., G. Godínez-Samora, D. De La Torre Ugarte, C. Heros, J. Lazo Lazo, E. Ruiz, B. Quispe, D. Diezcanseco et al. 2021. *Costos y beneficios de la carbono-neutralidad en Perú: una evaluación robusta*. Washington, D.C.: BID y 2050 Pathways Platform.
- Saget, C., A. Vogt-Schilb y T. Luu. 2020. *El empleo en un futuro de cero emisiones netas en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo y Organización Internacional del Trabajo.
- Vásquez, J. A., S. Zuñiga, F. Tala, N. Piaget, D. C. Rodríguez y J. M. Alonzo Vega. 2013. Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem. *Journal of Applied Phycology*, 26: 1081-1088.



Anexo

A.1

Resultados de emisiones sectoriales

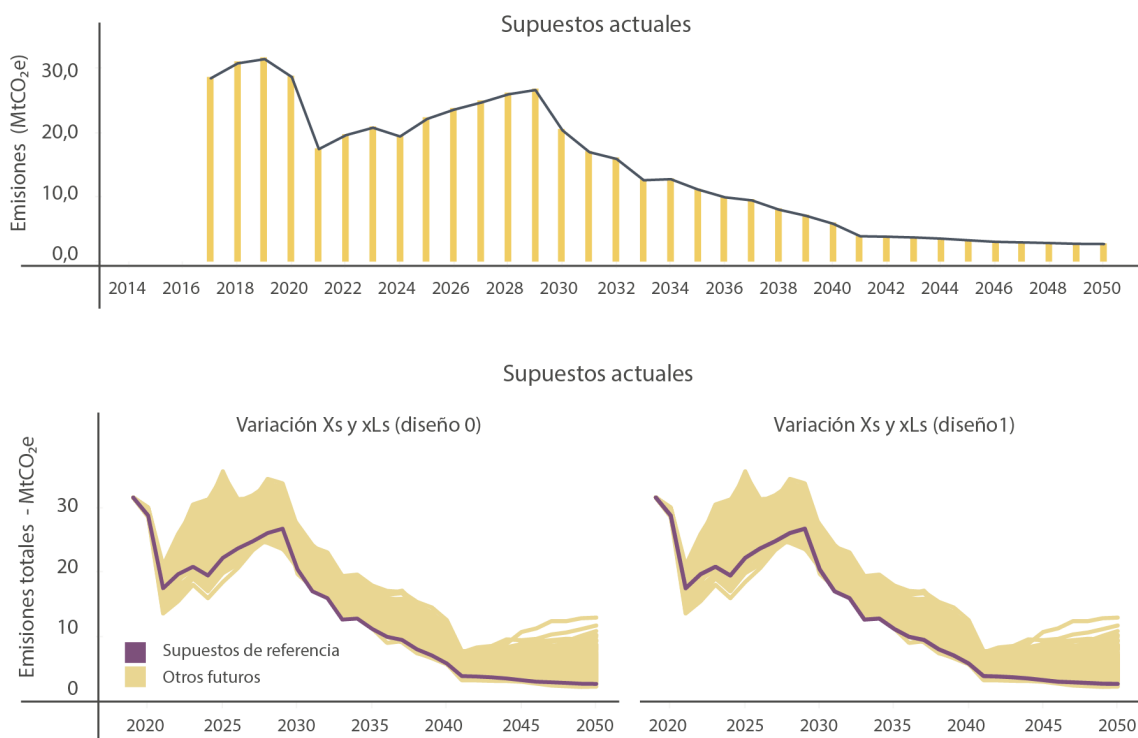
Generación eléctrica



El gráfico A1 muestra la proyección de emisiones para el caso determinístico (panel superior) y para los casos en los que se considera incertidumbre en los distintos parámetros modelados (paneles inferiores izquierdo y derecho). Al introducir incertidumbre se obtiene que la mayoría de los escenarios evaluados incrementan las emisiones en 2050 con respecto al escenario de NDC. La proyección del escenario NDC se realizó considerando un

escenario optimista para el desarrollo de fuentes renovables (costos de inversión bajos y precio de los combustibles alto). Por eso, al explorar escenarios alternativos de costos de inversión (más altos) y precio de los combustibles (más bajo), sumado esto a condiciones hidrológicas menos favorables (más secas), se observa una tendencia a que la participación de energía renovable disminuya y que la generación termoeléctrica (principalmente de gas natural) aumente.

Gráfico A1:
Proyección de emisiones del sector generación eléctrica



Fuente: Elaboración propia.

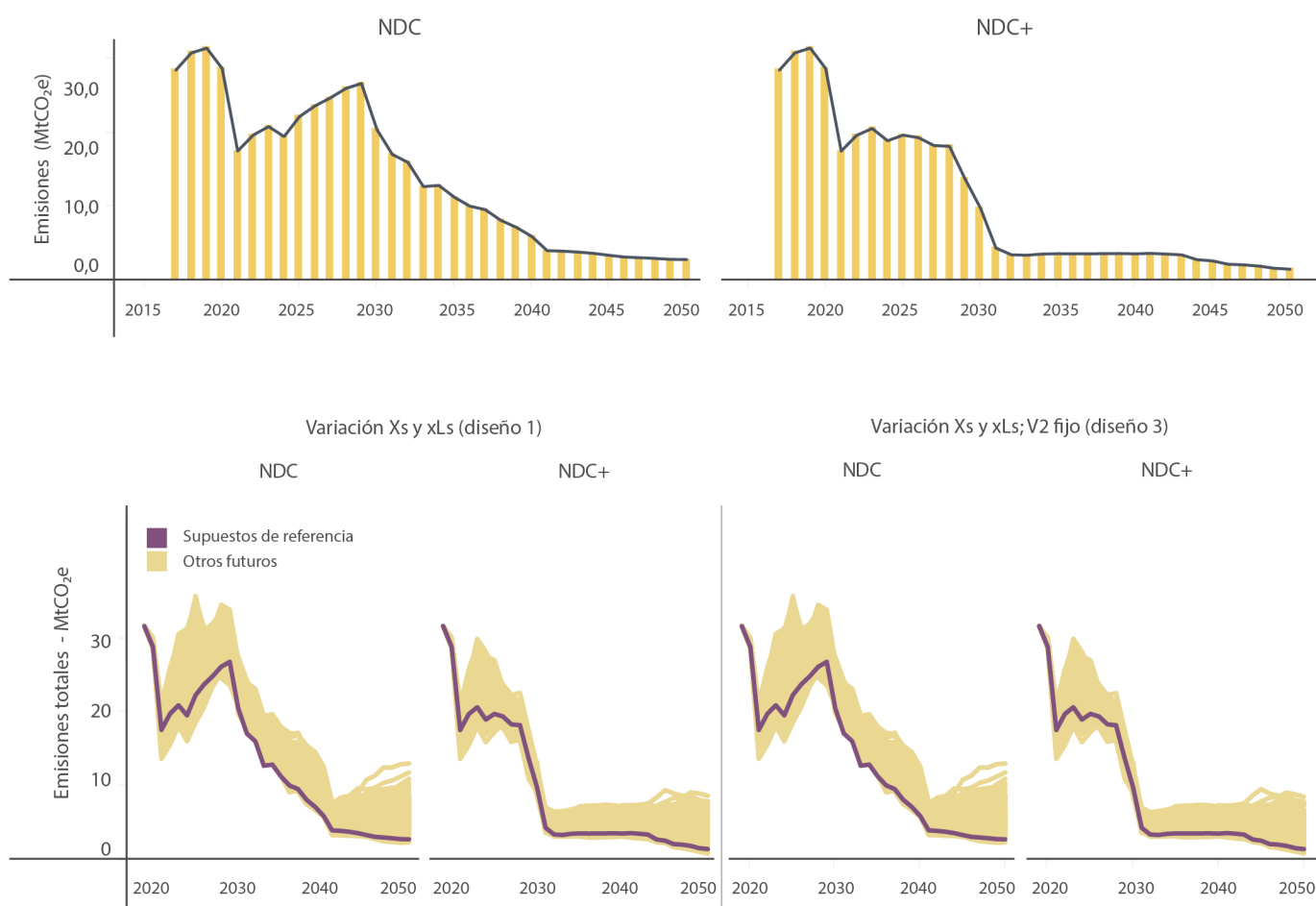
En el **gráfico A2** se presentan los resultados del escenario NDC+ para el sector generación eléctrica, en comparación con los resultados del escenario NDC. La inclusión de medidas adicionales reduce en 1,3 millón de tCO₂ las emisiones en 2050. Un efecto más significativo de estas medidas adicionales se observa en 2030, cuando el escenario NDC+ tiene 10,3 millón de tCO₂ menos que el escenario NDC. Asimismo, la inclusión de medidas

adicionales disminuye la variabilidad de las emisiones en 2050, momento en que las emisiones del escenario NDC+ varían entre 0,9 millón de tCO₂ y 8,7 millones de tCO₂.

El panel inferior derecho ("V2 fijo") muestra la variación de emisiones cuando se mantienen fijos los parámetros que definen la segunda condición de vulnerabilidad.

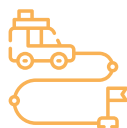
Gráfico A2:

Proyección de emisiones del sector generación eléctrica para el escenario NDC+, en comparación con el escenario NDC



Fuente: Elaboración propia.

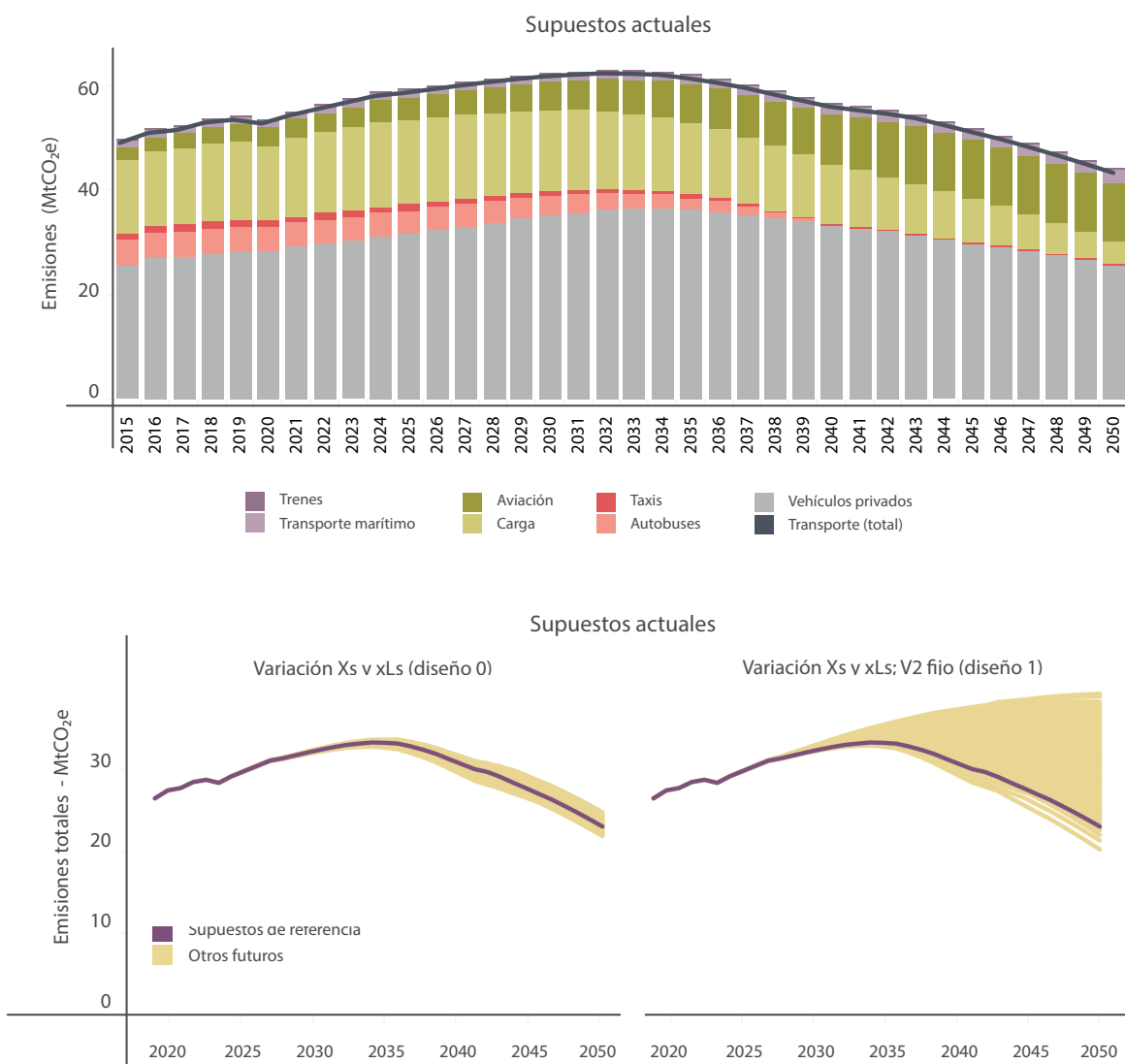
Transporte



El gráfico A3 exhibe la proyección de emisiones del sector transporte para el caso determinístico y para los casos en los que se considera incertidumbre en los distintos parámetros modelados. El panel inferior izquierdo considera solo incertidumbre en los parámetros como PIB, población, rendimientos de vehículos, etc., mientras que el panel inferior derecho incluye además incertidumbre en la

medida de electromovilidad en vehículos particulares e introducción de hidrógeno en camiones. Los resultados muestran que las emisiones para 2050 se podrían hasta duplicar en caso de no cumplir con las metas de participación de electromovilidad e hidrógeno, lo cual tiene un impacto significativo en las emisiones a nivel nacional.

Gráfico A3:
Proyección de emisiones del sector transporte para el escenario NDC

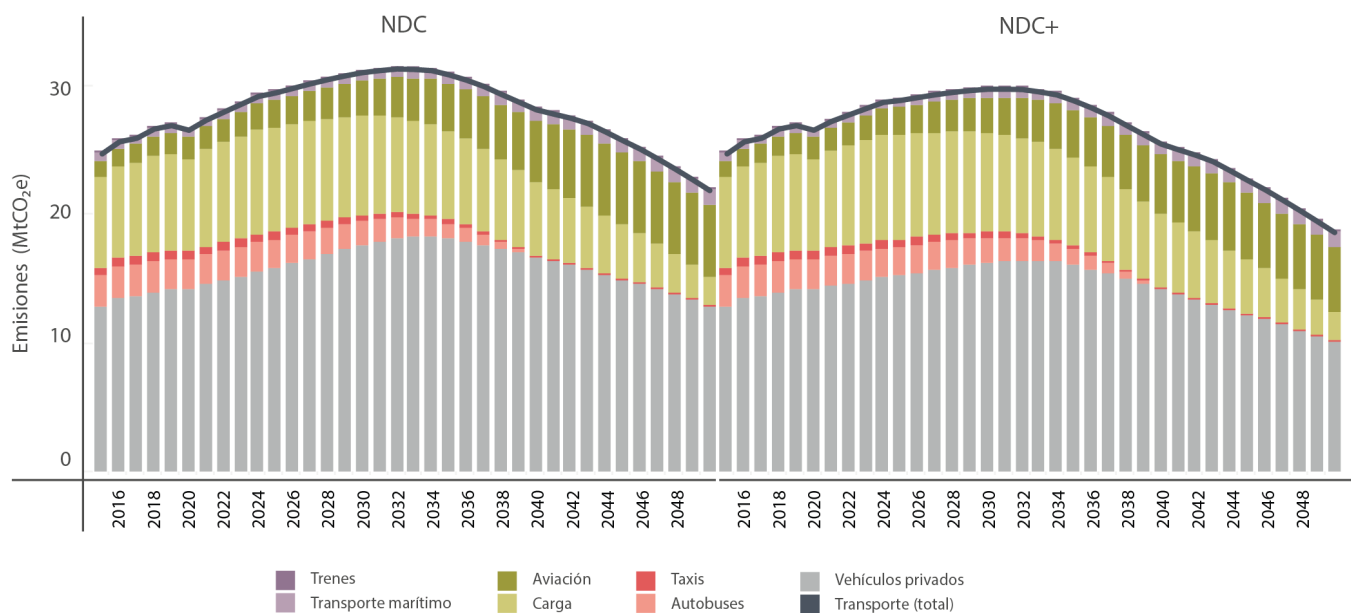


Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, en el gráfico A4 se pueden ver los resultados del escenario NDC+ para el sector transporte, en comparación con los resultados del escenario NDC. La inclusión de medidas adicionales reduce en 3 millones de

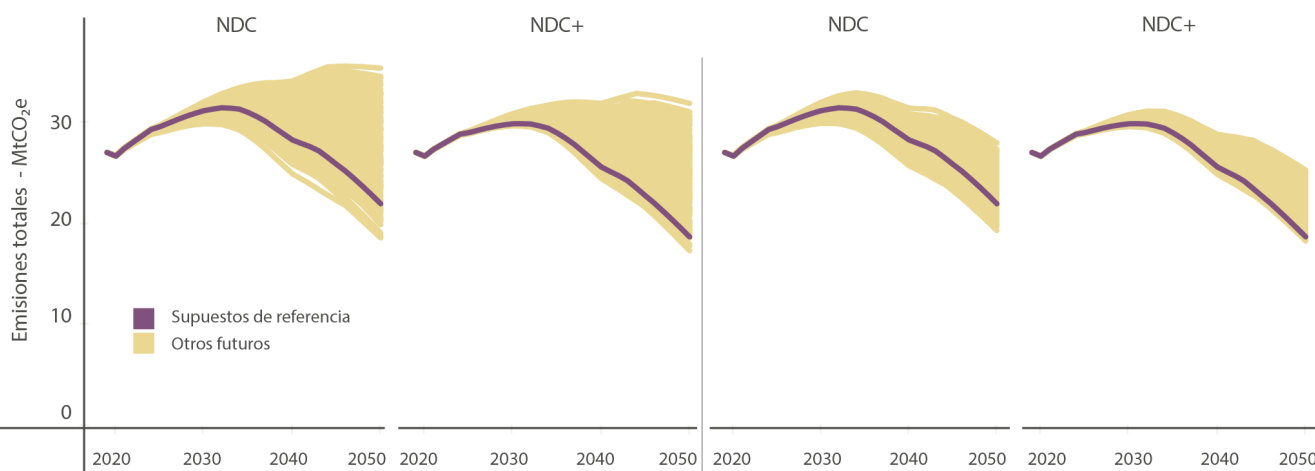
tCO₂ las emisiones del escenario de referencia en 2050 y la variabilidad oscila entre 17,4 millones de tCO₂ y 32 millones de tCO₂ en el mismo año.

Gráfico A4:
Proyección de emisiones del sector transporte para el escenario NDC+



Variación Xs y xLs (diseño 1)

Variación Xs y xLs; V2 fijo (diseño 3)



Fuente: Elaboración propia.

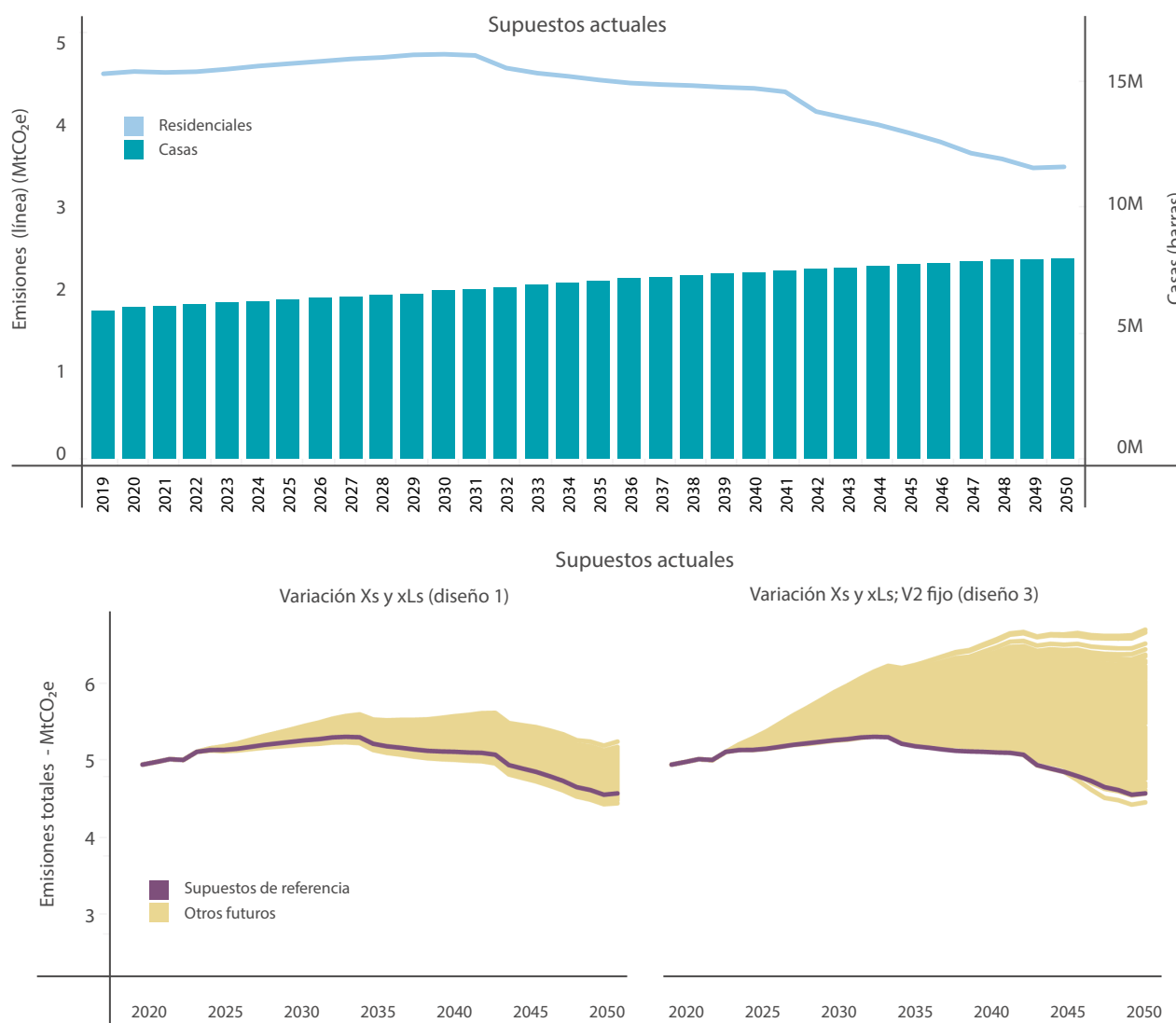
Residencial



La proyección de emisiones para el caso determinístico y para los casos en los que se considera incertidumbre en los distintos parámetros modelados del sector residencial se muestran en el gráfico A5. El panel inferior izquierdo considera solo incertidumbre en parámetros como población, tasa de ocupación, intensidad energética, etc., mientras que el panel inferior derecho incluye además incertidumbre en la medida de participación de sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria. El panel

inferior izquierdo indica una tendencia al aumento de las emisiones, debido a que se exploraron escenarios con una tendencia mayor a aumentar la cantidad de viviendas con respecto al NDC (lo cual se controló disminuyendo la tasa de ocupación). Esta tendencia se incrementa aún más al analizar escenarios con menor nivel de participación de sistemas solares térmicos, llevando a que las emisiones se eleven en más de un 50%.

Gráfico A5:
Proyección de emisiones para el sector residencial para el escenario NDC



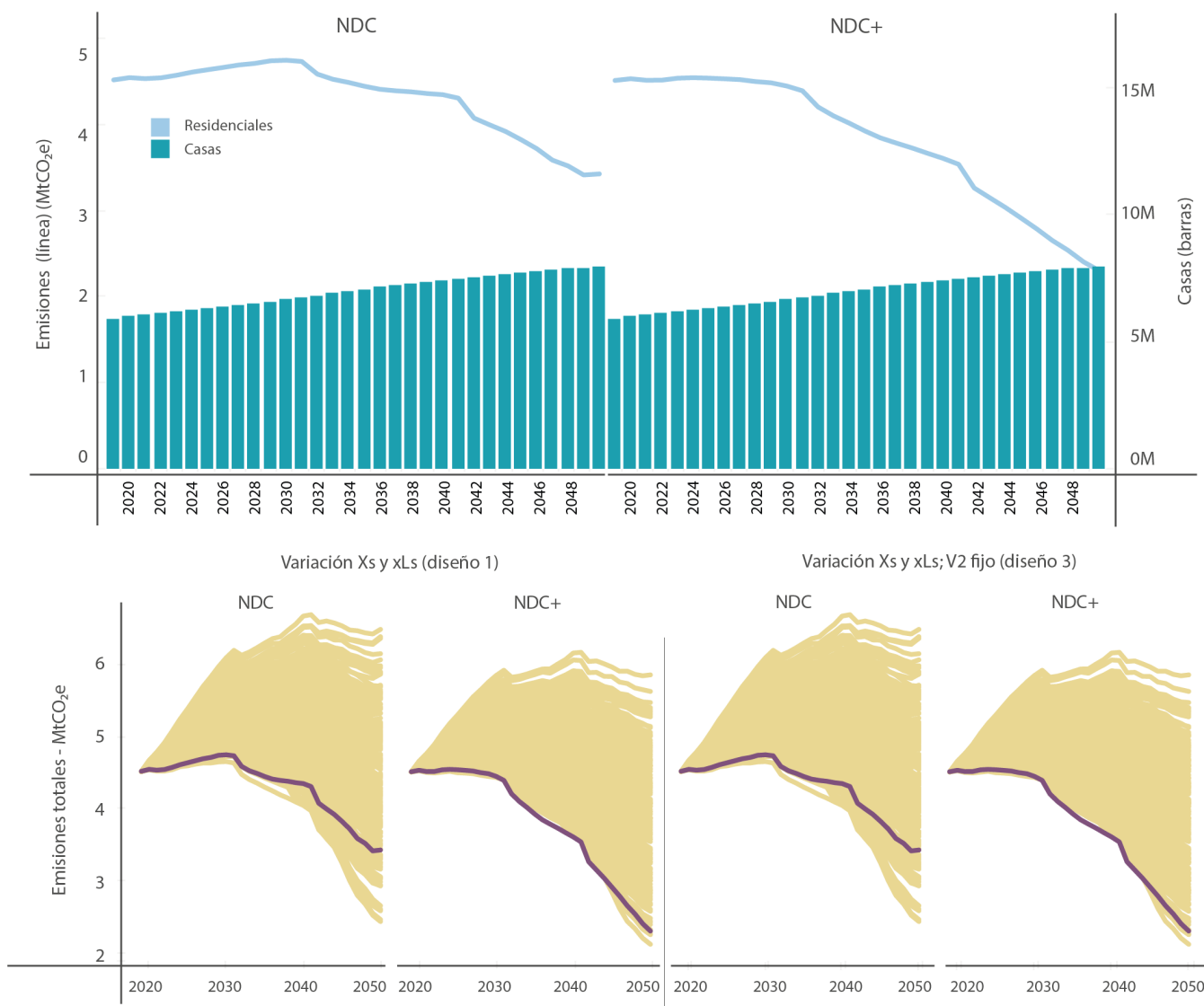
Fuente: Elaboración propia.

El **gráfico A6** muestra los resultados del escenario NDC+ para el sector residencial, en comparación con los resultados del escenario NDC. Las emisiones bajan de 3,4 millones de toneladas (con una variación de entre 2,4 millones de toneladas y 6,5 millones de toneladas) a 2,3 millones de toneladas (con una variación de entre 2,1 millones de toneladas y 5,9 millones de toneladas). En este caso, las medidas logran disminuir las emisiones en más de 1 millón de toneladas y además reducen el rango de variabilidad, aunque la mayor parte de los futuros

resultantes se ubican en la zona de mayores emisiones que el escenario de referencia.

La medida de los sistemas solares térmicos, en particular la asociada al uso en departamentos, es la que aporta la mayor incertidumbre en el resultado de emisiones de este sector. De la misma forma, la variabilidad asociada al motor de la tasa de ocupación de viviendas genera un fuerte impacto sobre esta incertidumbre en las emisiones totales del sector.

Gráfico A6: Proyección de emisiones para el sector residencial para el escenario NDC+, en comparación con el escenario NDC



Fuente: Elaboración propia.

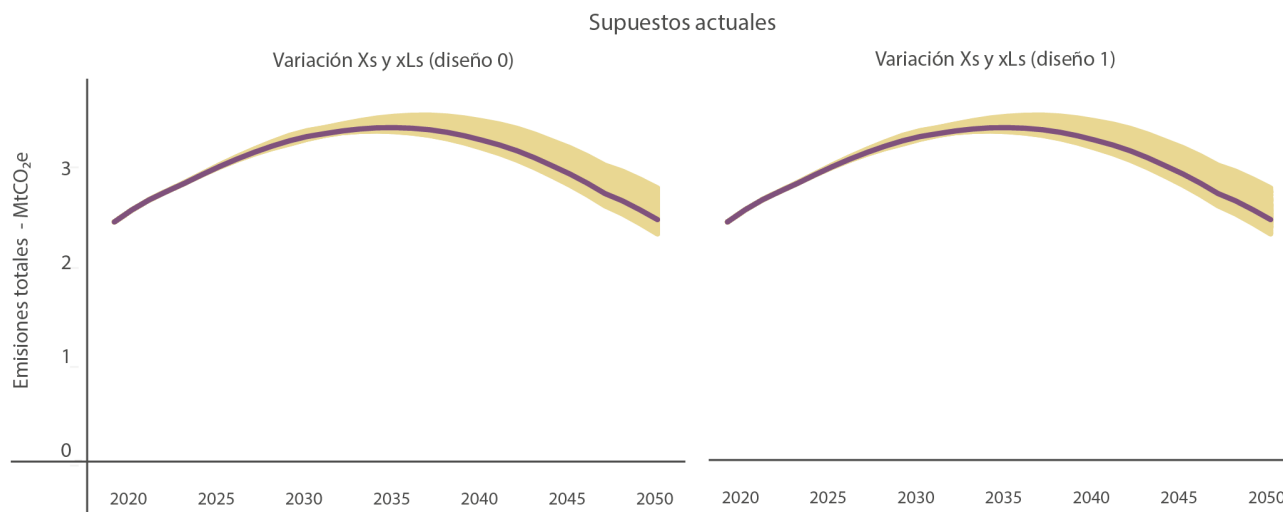
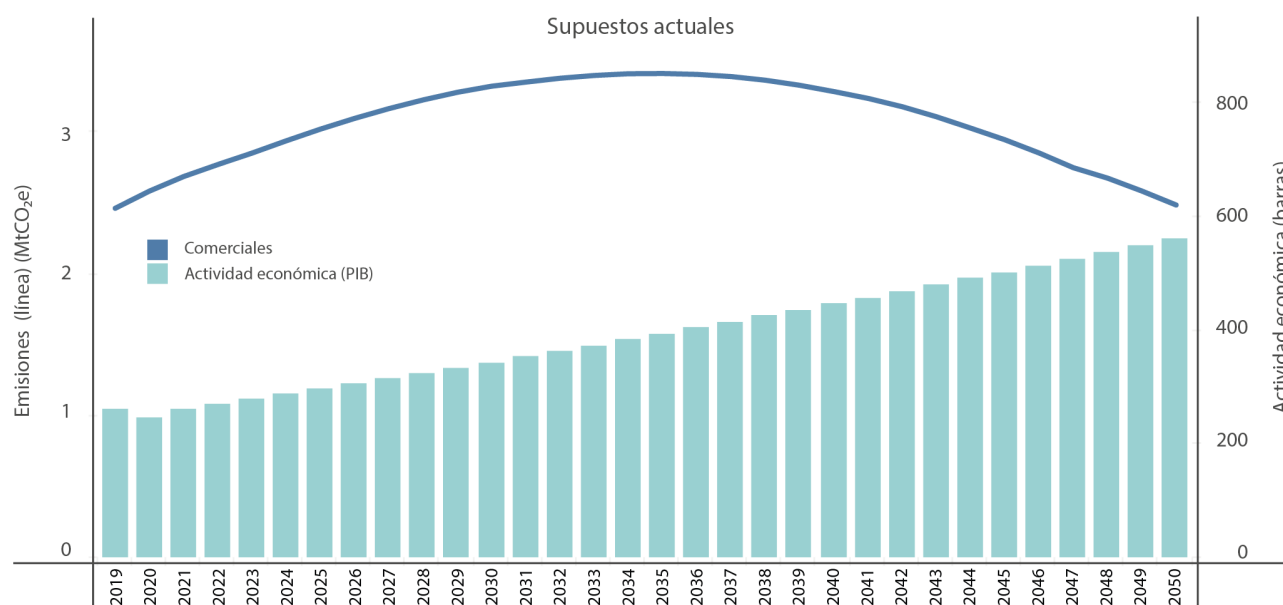
Comercial



En cuanto al sector comercial, el gráfico A7 muestra la proyección de emisiones para el caso determinístico y para el caso en que se toma en cuenta incertidumbre en los parámetros modelados: PIB y elasticidad demanda/PIB. No

se consideró incertidumbre en las medidas modeladas. Los resultados indican que la incertidumbre en los parámetros modelados no tiene un impacto significativo en la variación de las emisiones proyectadas a 2050.

Gráfico A7:
Proyección de emisiones del sector comercial



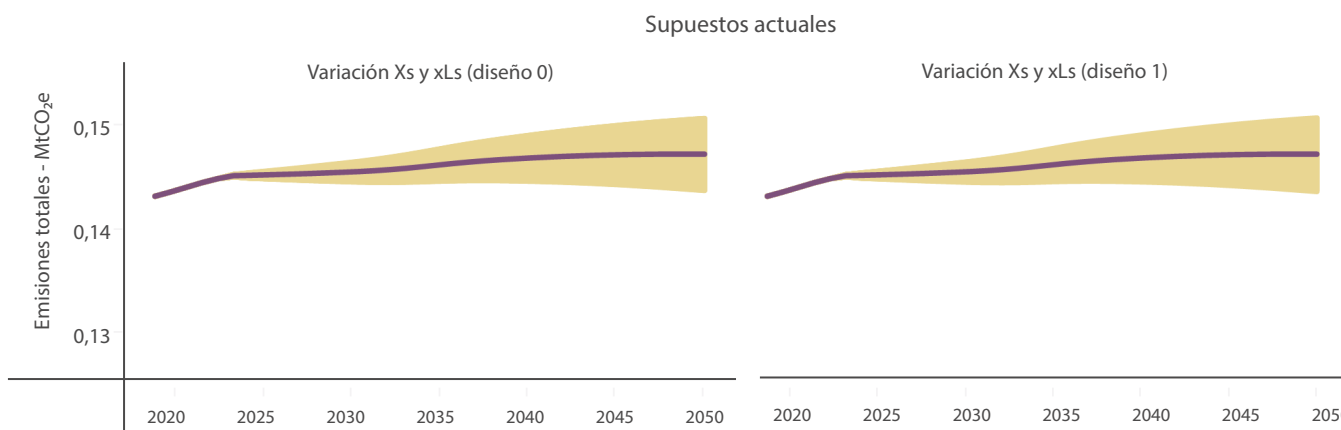
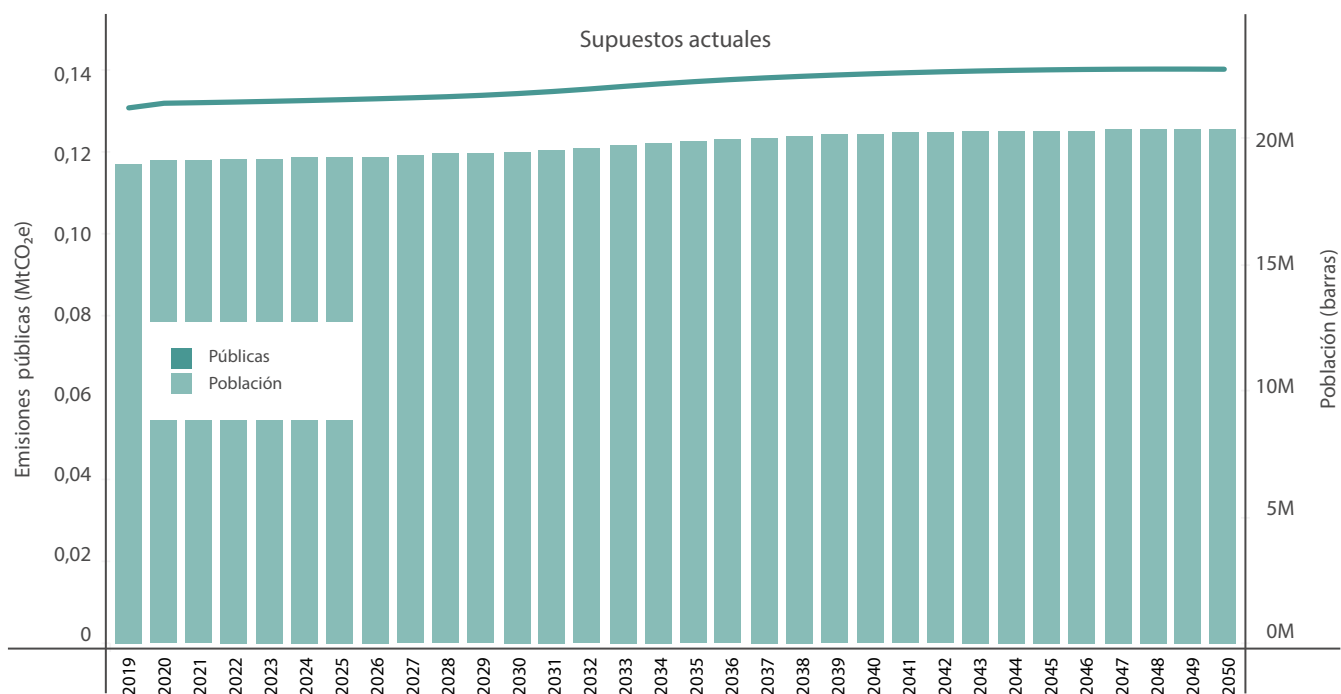
Fuente: Elaboración propia.

Público



En cuanto al sector público, el **gráfico A8** presenta la proyección de emisiones para el caso determinístico y para el caso en el que se considera incertidumbre. La proyección de emisiones de este sector tiene un bajo impacto a nivel nacional.

Gráfico A8:
Proyección de emisiones del sector público



Fuente: Elaboración propia.

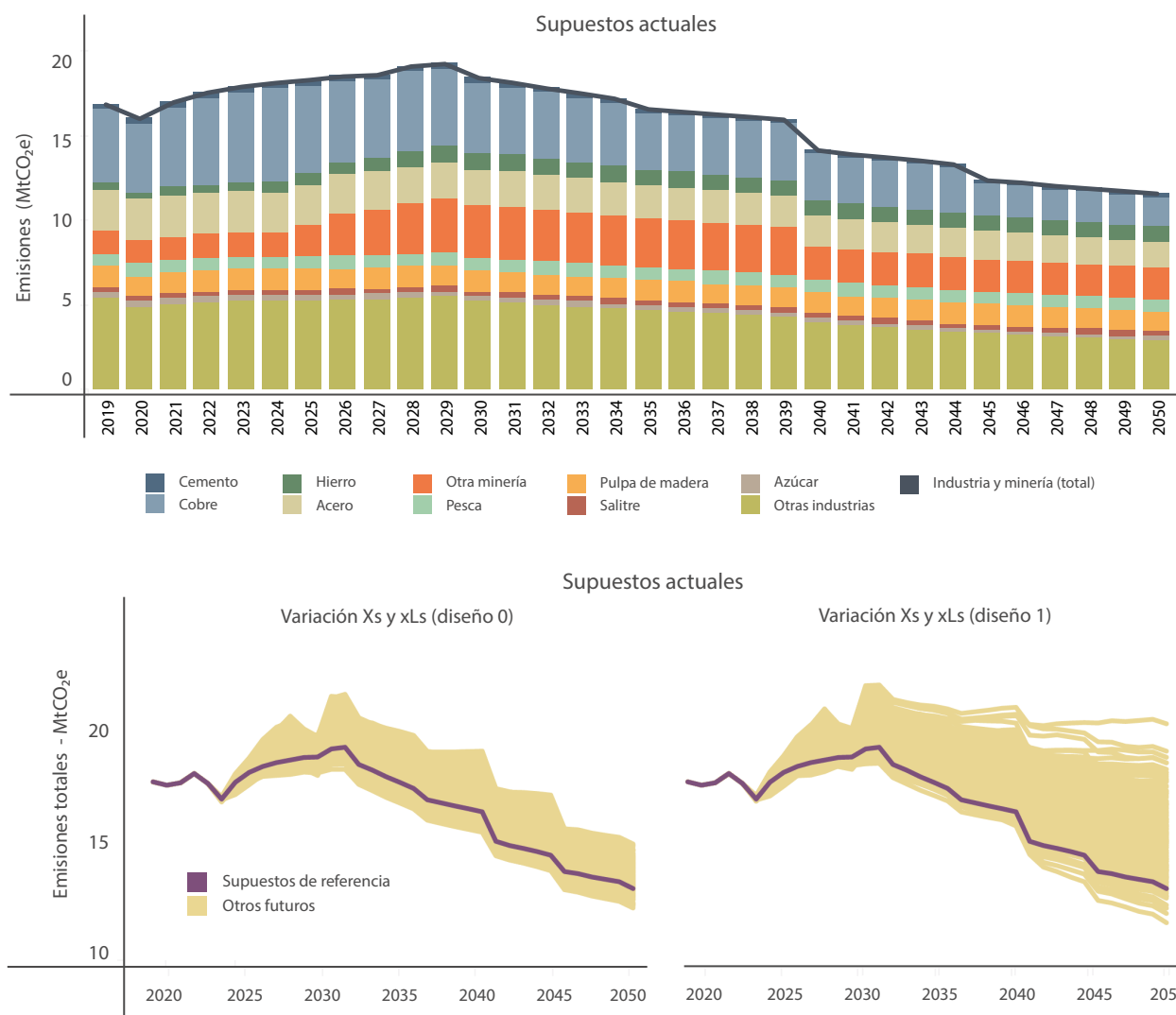
Industria y minería



El caso determinístico y los casos para los cuales se considera incertidumbre en los distintos parámetros modelados para el sector industria y minería se encuentran en el gráfico A9. El panel inferior izquierdo toma en cuenta solamente incertidumbre en los parámetros como PIB, producciones industriales, intensidades energéticas, etc., mientras que el panel inferior derecho incluye además incertidumbre en la

medida de participación de los sistemas solares térmicos y la electrificación de usos finales de mina rajo abierto. La incertidumbre en los parámetros da como resultado una distribución alrededor del escenario de referencia con una tendencia al aumento de las emisiones. Al incorporar incertidumbre, se observa que las emisiones en 2050 podrían incrementarse hasta un 100% con respecto al escenario de referencia.

Gráfico A9:
Proyección de emisiones del sector industria y minería



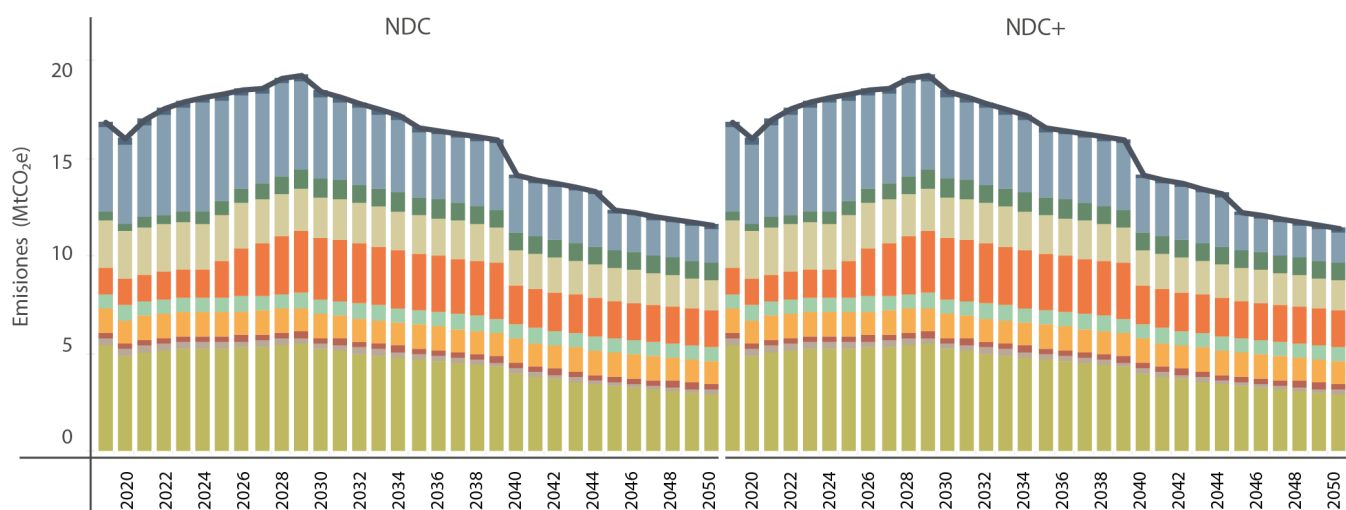
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las emisiones entre el escenario de referencia (NDC) y el escenario NDC+, se observa que estas bajan de 11,3 millones de toneladas (con una variación de entre 9,8 millones de toneladas y 19,0 millones de toneladas) a 11,1 millones de toneladas (con una variación de entre 10,1

millones de toneladas y 19,2 millones de toneladas). En este caso, las medidas de reducción de emisiones aplicadas al NDC+ logran reducir las emisiones en 0,2 millón de toneladas, manteniendo el rango de variabilidad entre ambos escenarios.

Gráfico A10:

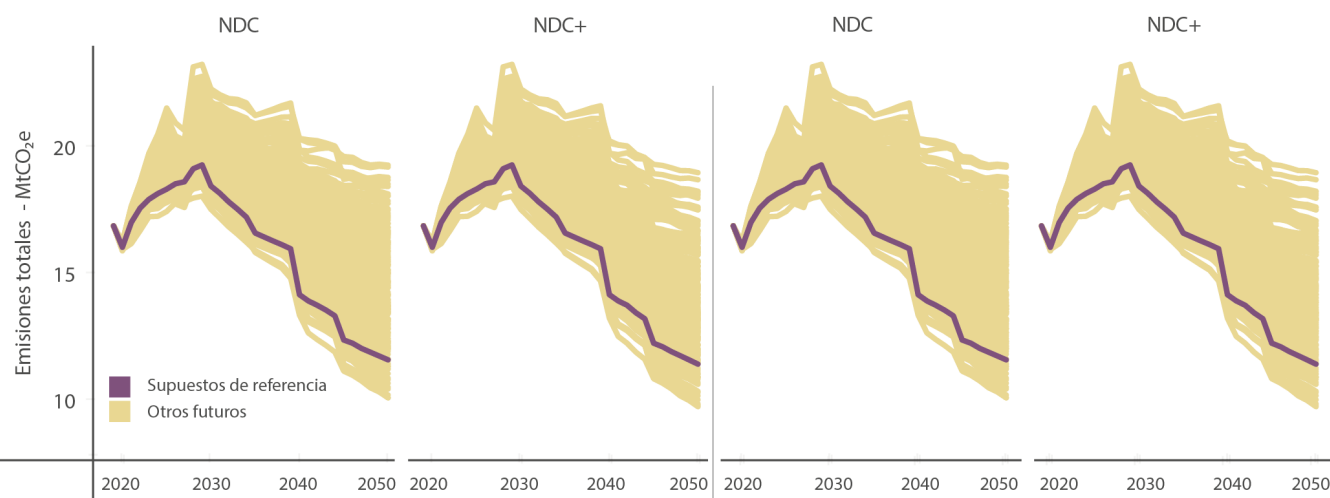
Proyección de emisiones del sector industria y minería para el escenario NDC+, en comparación con el escenario NDC



- Cemento
- Hierro
- Otra minería
- Pulpa de madera
- Azúcar
- Industria y minería (total)
- Cobre
- Acero
- Pesca
- Salitre
- Otras industrias

Variación Xs y xLs (diseño 1)

Variación Xs y xLs; V2 fijo (diseño 3)



Fuente: Elaboración propia.

Las medidas que más influyen en la incertidumbre de los resultados de este sector corresponden al uso de hidrógeno en camiones en la minería, junto con el uso de sistemas solares térmicos en industrias varias. De la misma forma, la variabilidad asociada a los motores de la

producción de cobre y minas varias, además de la intensidad energética en la producción de cobre, generan un fuerte impacto sobre esta incertidumbre en las emisiones totales del sector.

Procesos industriales y uso de productos

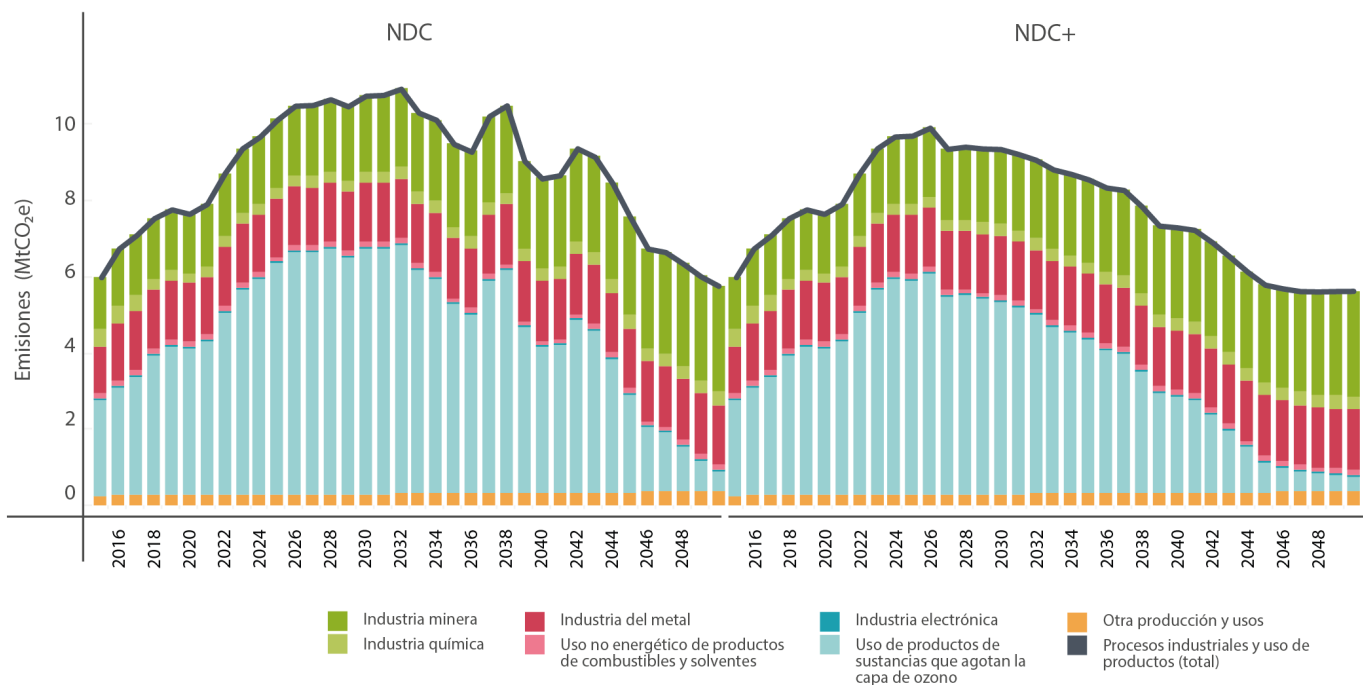


El **gráfico A11** expone la proyección de emisiones del sector de procesos industriales y uso de productos para el caso determinístico y para los casos en los que se considera incertidumbre en los distintos parámetros modelados tanto para los escenarios NDC como NDC+. En este sector, para 2050 las emisiones proyectadas son menores a las de los primeros años, reducción que se logra sobre todo por el efecto de la Enmienda de Kigali sobre las emisiones de

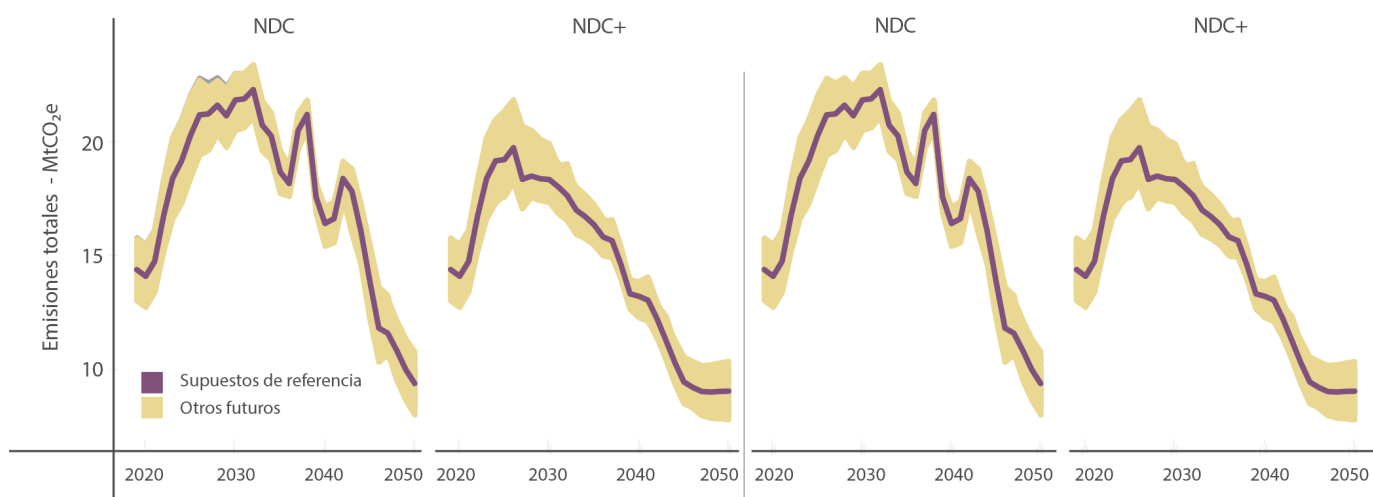
híbrido de fibra coaxial, observables en la categoría uso de productos alternativos a las sustancias que agotan la capa de ozono. Esta misma categoría es la principal responsable del aumento de los primeros años. Al comparar ambos escenarios, se observa que, si bien para 2050 el aporte de las medidas adicionales es pequeño, estas medidas sí tienen un efecto relevante en la trayectoria.

Gráfico A11:

Emisiones de procesos industriales y uso de productos en múltiples futuros para las estrategias NDC y NDC+



Variación Xs y xLs (diseño 1)



Fuente: Elaboración propia.

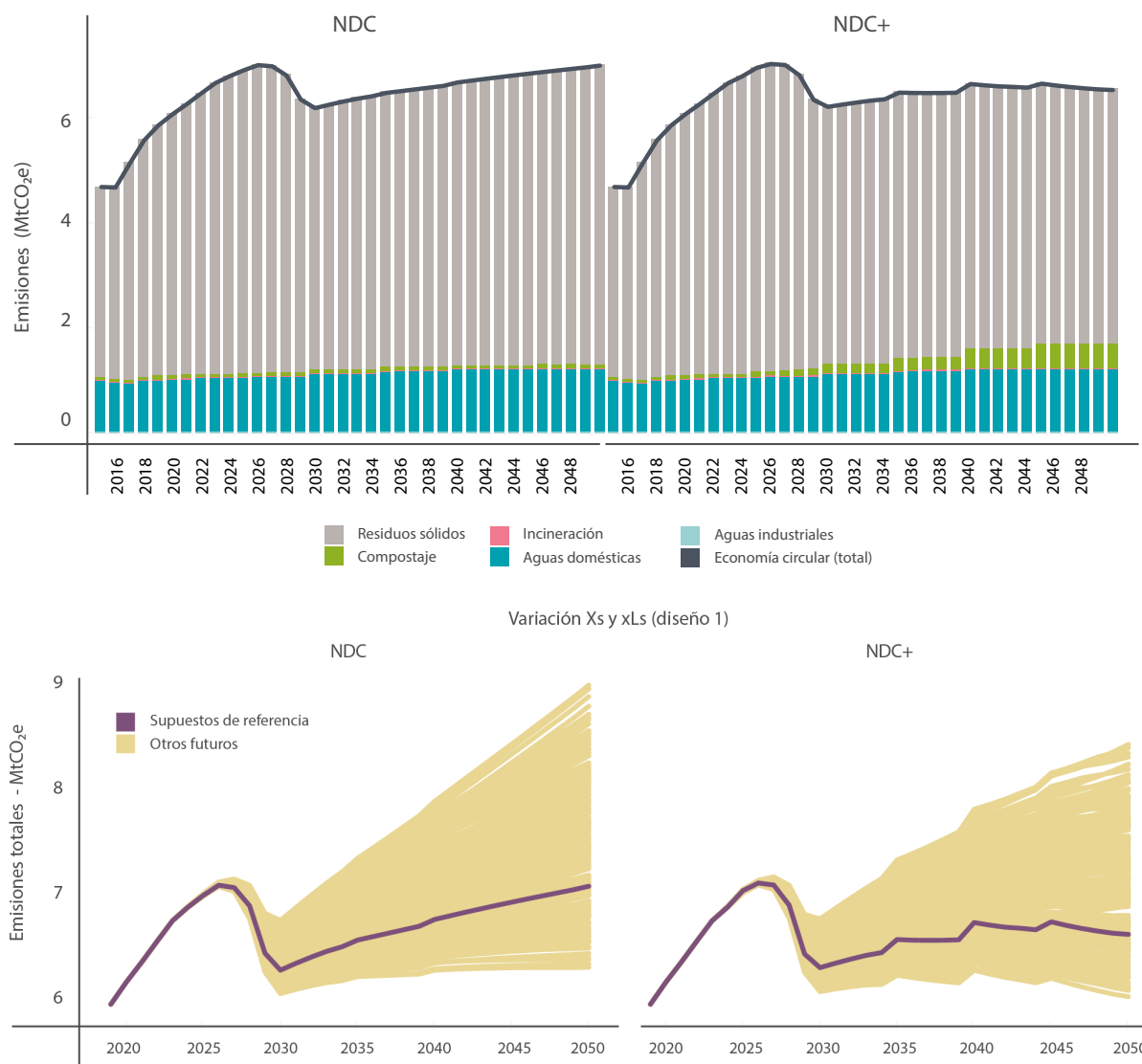
Residuos



La proyección de emisiones del sector residuos para el caso determinístico y para los casos en los que se considera incertidumbre en los distintos parámetros modelados tanto para los escenarios NDC como NDC+ se reflejan en el [gráfico A12](#). Las emisiones del sector tienen un crecimiento relevante en los primeros años, situación que alcanza su punto más alto hacia finales de la década de 2020. Esto se asocia a la incorporación de las nuevas

medidas de reducción de emisiones, especialmente a la captura y quema de biogás en los rellenos sanitarios. El mismo efecto se observa en el escenario NDC+, donde la incorporación gradual de plantas de compostaje permite evitar un aumento más pronunciado de las emisiones de residuos sólidos. Esta medida también contribuye a reducir levemente el margen de incertidumbre de las emisiones.

Gráfico A12:
Emisiones de residuos en múltiples futuros para las estrategias NDC y NDC+



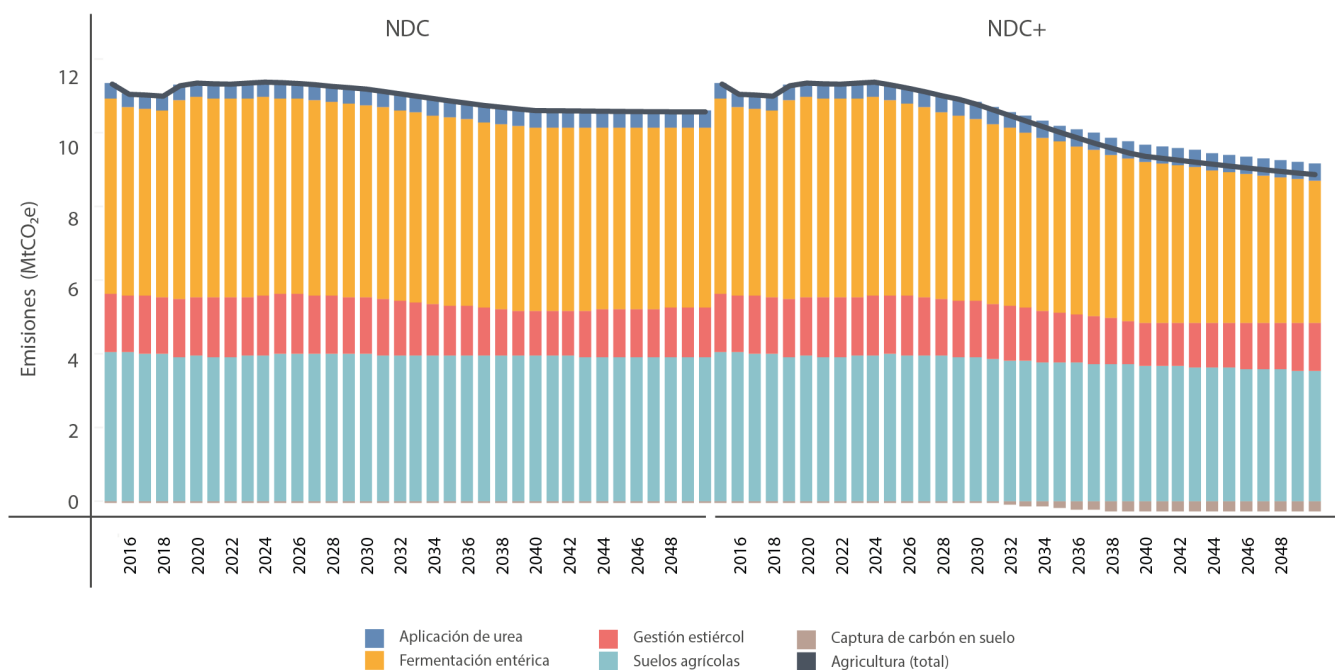
Fuente: Elaboración propia.



El **gráfico A13** exhibe los escenarios de emisiones de GEI futuros para 2050 (en MtCO₂eq/año) del sector agricultura, correspondientes al escenario evaluado bajo las medidas propuestas en la NDC para alcanzar la carbono-neutralidad para 2050 y el escenario en el que se consideran medidas adicionales a la NDC para el mismo año. El primero presenta un total de 10,5 MtCO₂eq/año para 2050 (escenario NDC, panel izquierdo); el segundo, un total de 8,8 MtCO₂eq/año para el año mencionado (escenario NDC+, panel derecho), tomando en cuenta los supuestos de referencia (sin incertidumbre) con su respectiva

composición de subcategorías. Las medidas consideradas para el escenario NDC incluyen el cambio en la dieta bovina, la creación de biodigestores para planteles porcinos y el uso eficiente del fertilizante. Entre las medidas adicionales cabe citar la agricultura regenerativa, que incluye el manejo holístico del ganado (bovino), la aplicación de enmiendas orgánicas y cambios en el consumo de carne bovina (producción nacional de carne), de las cuales la más significativa entre las medidas adicionales es esta última.

Gráfico A13: Emisiones del sector agricultura para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050



Fuente: Elaboración propia.

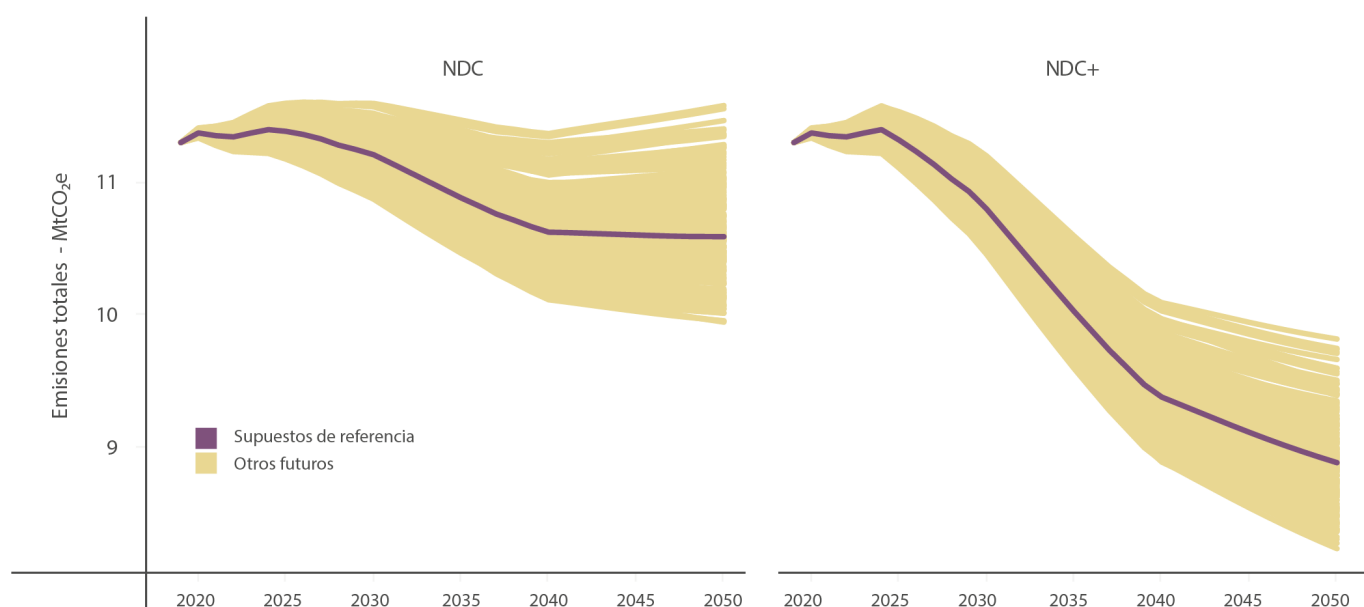
Nota: Las barras corresponden a cada una de las categorías del sector, y la línea azul marino, al total del sector.

Respecto de las incertidumbres asociadas a las emisiones proyectadas del sector (incluidas las medidas de reducción de emisiones), en el [gráfico A14](#) se muestran las emisiones bajo una serie de futuros alternativos para el escenario NDC (panel izquierdo) y escenario NDC+ (panel derecho), considerando incertidumbre en los distintos parámetros modelados. Se consideró incertidumbre en los parámetros de proyección, de precio de la carne bovina, maíz y soya, y además en las medidas del escenario especificadas en la sección 3.6 del capítulo 3, bajo criterio experto derivado del proceso participativo desarrollado en el marco de este proyecto.

La incertidumbre en los parámetros da como resultados una distribución alrededor del escenario de referencia con una leve tendencia al aumento de las emisiones para ambos escenarios, NDC y NDC+. Para el caso del escenario NDC (izquierda), la captura del sector para 2050 varía entre 11,56 MtCO₂eq en el futuro más pesimista y 9,95 MtCO₂eq en el más optimista, con una oscilación porcentual en relación con el escenario de referencia entre un aumento del 9,1% o una disminución del 6,1%. Para el escenario NDC+ (derecha), la captura del sector para 2050 oscila entre 9.823 MtCO₂eq en el futuro más pesimista y 8.242 MtCO₂eq en el más optimista, con una oscilación porcentual en relación con el escenario de referencia entre un aumento del 10,5% o una disminución del 7,3%.

Gráfico A14:

Emisiones totales del sector agricultura para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050, considerando incertidumbres



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se muestran trayectorias de emisiones para distintos futuros (color claro). El futuro que recoge los supuestos de referencia se presenta en color violeta.

Bosques y biodiversidad

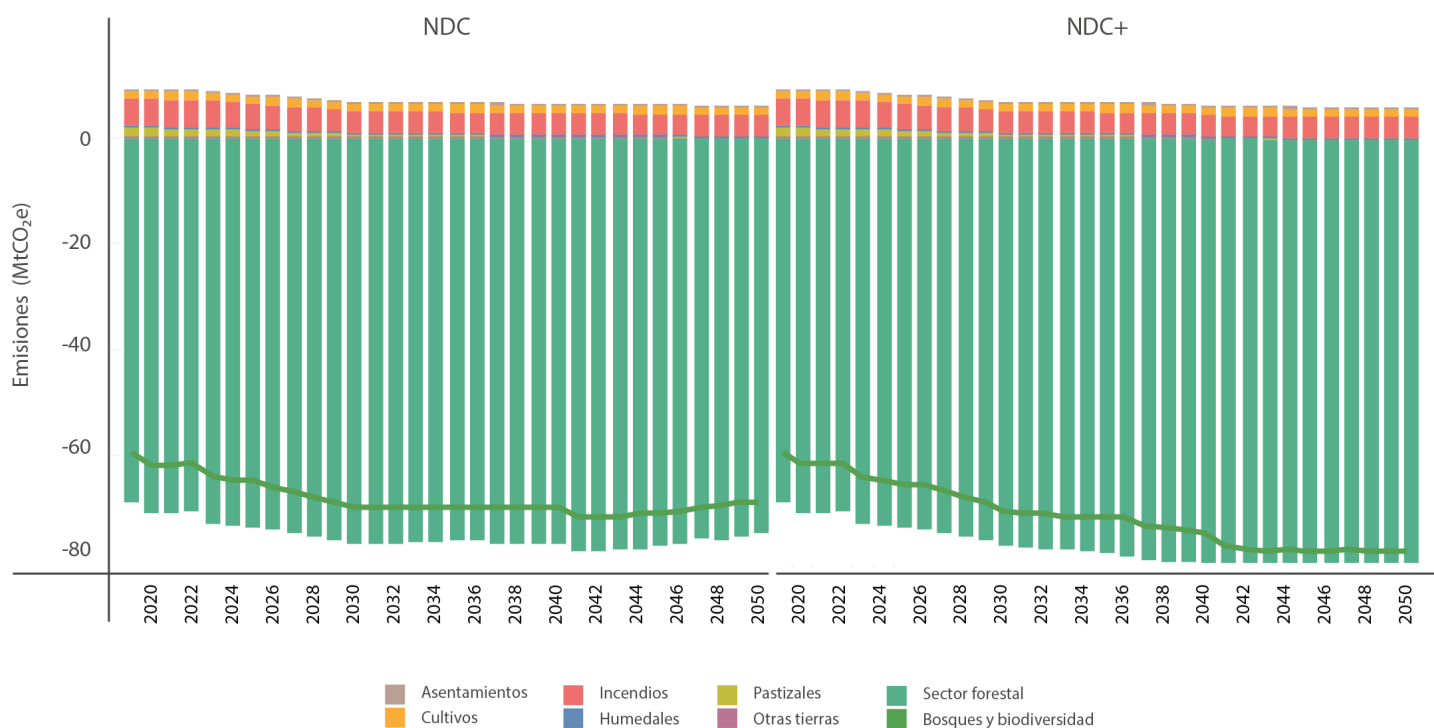


En el panel izquierdo del gráfico A15 se presentan los resultados sin considerar incertidumbre (supuestos de referencia), para las distintas categorías de uso de la tierra, siendo la categoría de tierras forestales la que agrupa las capturas del sector. En total, para el sector bosques y biodiversidad se proyecta una captura neta de 68,6 MtCO₂e para 2050 en el escenario NDC y de 78,2 MtCO₂e para 2050 en el escenario NDC+, en cuyo caso las medidas

adicionales implican un aumento del 14% en las capturas del sector. Estas medidas adicionales contemplan el manejo de bosques de algas pardas, el aumento de la superficie de parques y reservas nacionales, la cuantificación de la captura en productos de madera recolectada, y la continuación de las medidas de forestación y aumento de planes de manejo hasta 2050.

Gráfico A15:

Emisiones del sector bosques y biodiversidad para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050



Fuente: Elaboración propia.

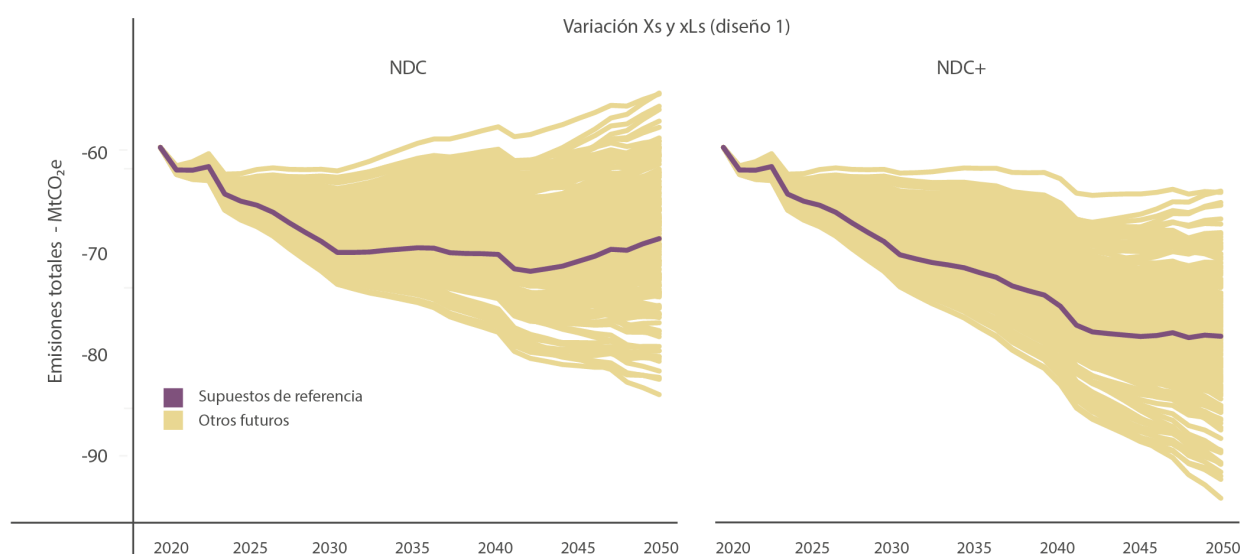
Nota: Las barras corresponden a cada una de las categorías de uso de tierra del sector y la línea verde, al total del sector.

En el [gráfico A16](#) se considera la modelación del sector incluyendo las incertidumbres mencionadas en la sección 3.6 del capítulo 3, considerando las estrategias NDC (izquierda) y NDC+ (derecha), asociadas a la modelación del sector y a la aplicación de las medidas asociadas a cada estrategia. Esto genera una desviación en otros futuros supuestos a partir del escenario de referencia. Para el caso

del escenario NDC (izquierda), la captura del sector para 2050 oscila entre 54,4 MtCO₂eq en el futuro más pesimista y 84,0 MtCO₂eq en el más optimista. Al considerar el escenario NDC+, con medidas adicionales, la captura para 2050 tiene una variación entre el futuro más pesimista y el más optimista de 64,0 MtCO₂eq y 94,2 MtCO₂eq, respectivamente.

Gráfico A16:

Emisiones totales del sector bosques y biodiversidad, para las estrategias NDC y NDC+ hasta 2050, considerando incertidumbres



Fuente: Elaboración propia.

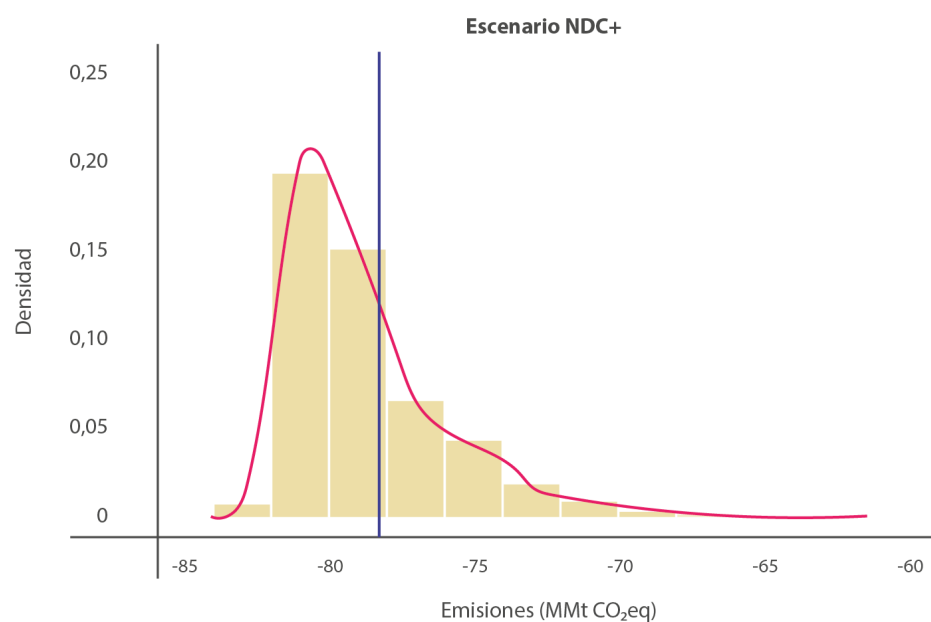
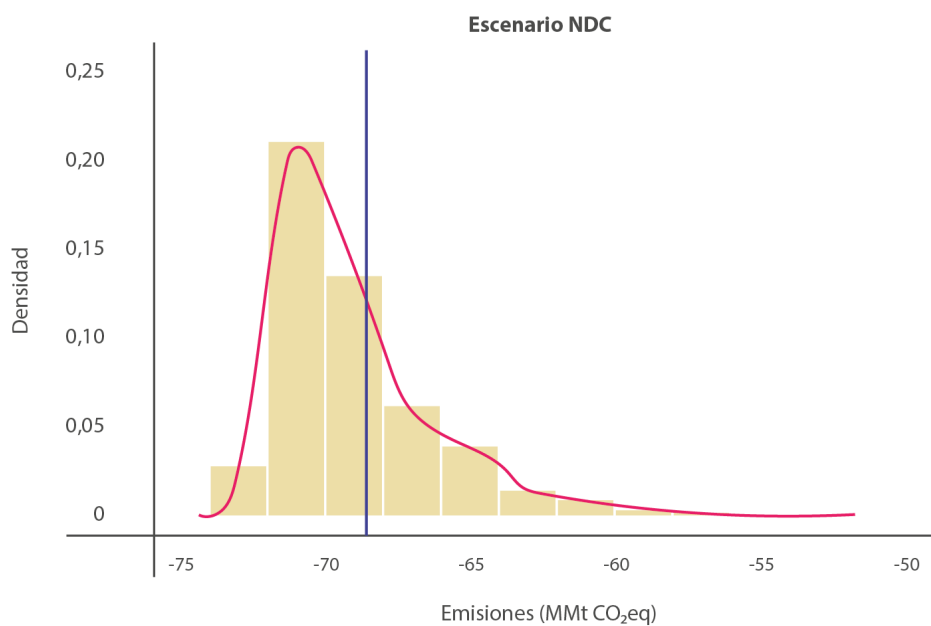
Nota: Se muestran trayectorias de emisiones para distintos futuros (color claro). El futuro que recoge los supuestos de referencia se presenta en color violeta.

Los incendios representan una fuente de alta variabilidad para el sector, que para efectos de la modelación integrada se suavizó al usar los valores promedio de incendios. No obstante, si se busca alcanzar la carbono-neutralidad para 2050 como año específico, existe el riesgo de que dicho año ocurra un "megaincendio"; esto podría desviar fuertemente las emisiones de ese año, lo que ya ha ocurrido en 2017, ya que pueden generarse picos de emisiones que afecten considerablemente la condición de sumidero de este sector. En el [gráfico A17](#) se muestran histogramas y distribuciones de frecuencia obtenidas a partir de una muestra de 500 posibles futuros considerando las distribuciones de superficie de incendios a nivel histórico. En estos gráficos la línea azul representa la emisión del sector de 2050 bajo los supuestos de referencia.

Para el caso de ambas estrategias, en un 30% de los casos la captura del sector debido a los incendios forestales es menor que la captura que se obtiene considerando los supuestos de referencia (en los gráficos, casos a la derecha de la línea azul). Esto impacta directamente en las posibilidades de alcanzar la carbono-neutralidad. Para 2050, en la estrategia NDC, en aproximadamente uno de cada siete futuros (13,4%), no sería posible alcanzar la carbono-neutralidad debido al aumento de las emisiones derivadas de incendios de escala más grande que los considerados en los supuestos de referencia. Por otra parte, para el caso de la estrategia NDC+, la carbono-neutralidad se alcanza en todos los futuros considerados, incluso en aquellos que consideran mayores superficies de incendios. Esto resalta la necesidad de tomar en cuenta medidas adicionales a las señaladas como base en la NDC.

Gráfico A17:

Histograma y distribución de frecuencias de las emisiones asociadas al sector bosques y biodiversidad en 2050, considerando una muestra de 500 futuros para las estrategias NDC y NDC+



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La línea azul representa la emisión del sector para el futuro de referencia.


A.2

Organizaciones consultadas

Este estudio está basado en valiosos insumos y retroalimentación que se obtuvieron durante numerosos talleres con partes interesadas, incluyendo las agencias y organizaciones siguientes:

- Acción Empresas
- Agencia de Sostenibilidad Energética
- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático
- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático
- AGH Consultoría Estratégica
- Agricom
- Anagea
- Anglo American Chile
- Antofagasta Minerals
- Arauco
- Asociación de Empresas Eléctricas, AG
- Asociación de Generadoras
- Asociación de Municipalidades de Chile
- Asociación de Municipalidades para la Sustentabilidad Ambiental
- Asociación Empresas Gas Natural
- Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento
- Banco Interamericano de Desarrollo
- BID Invest
- Cámara Chilena de la Construcción
- Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización A.G.
- Carnes Manada
- Casa de la Paz
- CCU
- Cementos Bío Bío
- Centro Avanzado de Tecnología para la Minería
- Centro de Cambio Global UC
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia
- Centro de Desarrollo Urbano Sustentable UC
- Centro UC de innovación en Madera
- Chile Sustentable
- Colbún
- Comisión Chilena del Cobre
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe
- Comisión Nacional de Riego
- Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones
- Consejo de la Sociedad Civil Ministerio de Energía
- Consejo Minero
- Consorcio Lechero
- Construye 2025
- Consultora EBP
- Corporación Capital Biodiversidad
- Corporación Chilena de la Madera AG
- Corporación de Estudios para Latinoamérica
- Corporación de Fomento de la Producción
- Corporación Nacional del Cobre de Chile
- Corporación Nacional Forestal
- Corporate Leaders Group for Climate Change-Chile
- Departamento de Ingeniería de Minas - Universidad de Chile
- Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción
- Departamento Nacional de Planeación de Colombia
- Deuman
- Dinámica Plataforma
- EBP Chile
- Ecoscience

- Efecto Manada
- Empresas Eléctricas A.G.
- EnergyLab - SOFOFA
- Fondo Forestal Atacama Invest
- Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF)
- Fundación Chile
- Fundación Terram
- Generadoras de Chile
- GIZ (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional)
- GPM AG
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias
- Instituto Forestal
- KDM
- LincGlobal
- Madera Alto Valor
- Melón
- Ministerio de Ciencias
- Ministerio de Defensa
- Ministerio de Economía
- Ministerio de Energía
- Ministerio de Hacienda
- Ministerio de Minería
- Ministerio de Obras Públicas
- Ministerio de Relaciones Exteriores
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo
- Ministerio Medio Ambiente
- Ministerio Obras Públicas
- Nissan Latam
- Oficina de Cambio Climático
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias
- Partnership for Market Readiness Chile
- PEFC Chile
- Polpaico
- Pontificia Universidad Católica de Chile
- SAAM
- Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA)
- Sistema Chileno de Certificación de Manejo Forestal Sustentable
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE)
- Subsole
- The Nature Conservancy (TNC)
- Tikuna
- Transelec
- UNEP-DTU Partnership
- Unidad Ozono - Ministerio Medio Ambiente
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
- Universidad Adolfo Ibáñez
- Universidad Austral de Chile
- Universidad Bernardo O'Higgins
- Universidad de Chile
- Universidad de Concepción
- Universidad de La Frontera
- Universidad Mayor
- Universidad Técnica Federico Santa María
- Universidad Técnica Federico Santa María
- Uno.Cinco
- Verra
- Viña Emiliana
- Vínculo Agrario
- World Conservation Society



Chile busca alcanzar la carbono-neutralidad para 2050. Para lograr ese objetivo, su contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) propone una estrategia que consiste en una serie de transformaciones sectoriales, como cerrar las centrales de carbón, fomentar la electromovilidad y aumentar las capturas de los bosques.

Este estudio evalúa el desempeño de dicha estrategia bajo una amplia gama de incertidumbres económicas, ambientales y tecnológicas. Identifica las vulnerabilidades de la estrategia, es decir, en qué condiciones las transformaciones sectoriales resultan insuficientes para alcanzar la meta de cero emisiones netas. Luego, cuantifica opciones para robustecer la NDC, esto es: para reducir la posibilidad de no alcanzar la carbono-neutralidad.

Las medidas adicionales analizadas incluyen el retiro acelerado de las centrales eléctricas de carbón, el fomento del teletrabajo, el transporte no motorizado, la reducción del consumo de carne de vacuno, la expansión del reacondicionamiento térmico de viviendas, el aumento de la forestación, el manejo sostenible de bosques y el incremento de las áreas protegidas. Estas medidas se basan en ideas que han sido propuestas por expertos sectoriales durante un proceso participativo. Finalmente, una evaluación macroeconómica encuentra que robustecer la NDC resultaría en una ganancia neta del 0,8% del nivel del producto interno bruto (PIB) para 2050.