

Mayo 2025

# **RESUMEN DE ESCENARIOS DE MITIGACIÓN PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LA NDC 2025**

*Sistema Nacional de Prospectiva*  
**SNP**

## Sistema Nacional de Prospectiva

### Contenido

1.	Introducción .....	3
2.	Proyecciones sectoriales .....	3
2.1	Sector Energía para la NDC 2025 .....	3
2.1.1	Proyecciones sector energía.....	4
2.1.2	Resultados de proyecciones de GEI en escenarios PSM, PSM (con esfuerzo adicional) y Carbono Neutralidad.....	10
2.2	Metodología general de sectores no energéticos.....	14
2.2.1	Drivers para proyección de datos de actividad por sector .....	14
2.2.2	Metodología para la estimación de emisiones de GEI: Directrices del IPCC del 2006 y Refinamiento del 2019 .....	15
2.3	Sector IPPU para la NDC 2025 .....	15
2.3.1	Proyección de datos de actividad del sector IPPU .....	16
2.3.2	Proyecciones IPPU escenario base.....	18
2.3.3	Proyecciones IPPU escenario con medidas.....	19
2.4	Sector Agricultura para la NDC 2025.....	22
2.4.1	Proyección de datos de actividad del sector Agricultura .....	23
2.4.2	Proyección Agricultura escenario base .....	24
2.4.3	Proyección Agricultura escenario con medidas.....	25
2.5	Sector UTCUTS para la NDC 2025.....	27
2.5.1	Proyección de datos de actividad del sector UTCUTS.....	28
2.5.2	Proyección UTCUTS escenario base.....	29
2.5.3	Proyección UTCUTS escenario con medidas.....	29
2.6	Sector Residuos para la NDC 2025.....	31
2.6.1	Proyección de datos de actividad del sector Residuos .....	32
2.6.2	Proyección Residuos escenario base .....	33
2.6.3	Proyección Residuos escenario con medidas.....	34
3.	Resumen de proyecciones.....	36
4.	Reducciones por medidas.....	38
5.	Costos por medidas.....	41
5.1	Costo efectividad por medida.....	44
6.	Compromiso de reducción de carbono negro .....	47
7.	Conclusiones .....	48

### 1. Introducción

Durante el año 2025, Chile presentará la actualización de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en ella se compromete a nuevas metas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático para el siguiente periodo de 10 años, considerando al menos sostener el nivel de ambición presentado en la anterior NDC. El procedimiento para desarrollar la NDC, conforme al Decreto N° 16/2023 del Ministerio de Medio Ambiente, exige la preparación de un anteproyecto para ser sometido a consulta pública el cual se publicó el 17 de enero de 2025 y estará disponible hasta el 11 de marzo de 2025.

Además, el 3 de diciembre de 2024 se publicó el Decreto N° 17/2024 del Ministerio de Medio Ambiente (MMA) que regula el funcionamiento de los sistemas de acceso a la información de cambio climático, entre ellos el Sistema Nacional de Prospectiva (SNP). Si bien este análisis antecede a la regulación, es una puesta en marcha de la operación del SNP.

Este documento es un resumen del análisis prospectivo desarrollado para elaborar las metas cuantitativas de la actualización 2025 de la NDC. En él se presentan análisis sectoriales considerando descriptivamente cada sector del inventario y la evaluación de sus medidas de mitigación. Finalmente se presenta el análisis nacional con el cual se elaboró la propuesta de compromisos para el anteproyecto de NDC.

### 2. Proyecciones sectoriales



El sector energía es el principal emisor de gases de efecto invernadero (GEI) en Chile, representando el 76,4% de las emisiones totales del país, lo que equivale a 84.790,9 ktCO<sub>2</sub>eq, según datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI)



## Sistema Nacional de Prospectiva

para el año 2022. Esta cifra representa el 50,6% del balance total de GEI del país para ese mismo año.

Respecto a las categorías de emisiones, el 98,7% de las emisiones de GEI del sector corresponden a la categoría Actividades de quema de combustible (1.A) y el 1,3% restante a la categoría Emisiones fugitivas de combustibles (1.B). Entre las subcategorías de la categoría 1.A.; Transporte (1.A.3) es la de mayor importancia dentro del sector con un 35,4% de participación, seguida de un 34,2% de las Industrias de la energía (1.A.1), 19,3% de Industrias manufactureras y de la construcción (1.A.2) y 9,8% de Otros sectores (1.A.4); el restante 1,3% corresponde a las subcategorías No especificado (1.A.5) y a las emisiones fugitivas de las subcategorías Combustibles sólidos (1.B.1) y Petróleo y gas natural (1.B.2)

En 2022, el principal GEI emitido por el sector fue el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), representando un 96,2% de las emisiones totales de GEI del sector. Lo sigue el metano ( $\text{CH}_4$ ) con un 2,7% y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) con un 1,1%.

### 2.1.1 Proyecciones sector energía

El Ministerio de Medio Ambiente (MMA) contrató los servicios de una consultoría para el desarrollo del estudio: “Consultoría de Apoyo a la Elaboración de Escenarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para el Anteproyecto De Contribución Determinada a Nivel Nacional” (608897-21-LP24).

Esta consultoría fue realizada por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en coordinación con el equipo técnico del Sistema Nacional de Prospectivas (SNP) del MMA y el apoyo institucional del Ministerio de Energía como contraparte del estudio. Es importante destacar que además se llevaron a cabo reuniones con todos los ministerios responsables de elaborar planes sectoriales de mitigación asociados al sector energía, de acuerdo con la ley N° 21.455 marco de cambio climático, además de otras instituciones del sector público y privado, como el Consejo Minero, el Instituto Forestal (INFOR) y la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC), para la recolección de información clave que sirviera como insumo a las proyecciones.

A diferencia de los demás sectores o categorías principales del INGEI, los escenarios de emisiones de GEI del sector energía son proyectados con el modelo PMR<sup>1</sup>. Este modelo es una herramienta de simulación y análisis desarrollada por el Centro de

---

<sup>1</sup> <https://modelopmr.cl/#/acercade>



## Sistema Nacional de Prospectiva

Energía de la Universidad de Chile para evaluar el impacto de distintos escenarios de mitigación de cambio climático.

El modelo está programado en Python y tiene un enfoque bottom-up, aunque considera otros enfoques en casos particulares como la evaluación de instrumentos de precio.

La estructura y alimentación del modelo se basa principalmente en el Balance Nacional de Energía y consecuentemente en la Planificación Energética de Largo Plazo, sin embargo, esta se ha ajustado ligeramente para poder acoplarse a la estructura del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.

Cada subsector es modelado de acuerdo con las metodologías y datos más actualizados disponibles. Sectores industriales y mineros son proyectados de acuerdo al crecimiento económico o a expectativas productivas. Los sectores comerciales, público y residenciales son determinados por expectativas de población, vivienda y crecimiento económico. El sector transporte proyecta su actividad en función de la actividad económica. En el caso de la producción eléctrica, esta esta modelada de forma de acoplarse con el plan de descarbonización del Ministerio de Energía (actualmente en consulta pública). Para mayor detalle de los niveles de actividad específicos y todos los análisis se solicita recurrir al informe final del estudio disponible en el expediente de la consulta pública del anteproyecto de la NDC.

Las principales salidas del modelo son:

- Proyección de oferta de generación eléctrica por central y tipo de tecnología.
- Proyección de demanda de energía para todos los sectores del Balance Nacional de Energía.
- Proyección de demanda de demanda eléctrica.
- Proyección de capacidad instalada.
- Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) desagregada por tipo de gas para todos los sectores.
- Proyección de costos de inversión, operación y mantenimiento.

El modelo tiene un alcance regional y considera como año base el año 2022 que es el último disponible del INGEI. Adicionalmente se considera como base información disponible a la fecha del cierre técnico del estudio que fue el último trimestre de 2024. Esto implica que, por ejemplo, se ha considerado información real, completa o parcial, de producción eléctrica por tecnológica hasta el año 2024, o ventas de vehículos



## Sistema Nacional de Prospectiva

eléctricos hasta el 2024. Además, se consideran los factores de emisión y potenciales de calentamiento global del primer BTR nacional (AR5).

Otra componente importante del estudio es la inclusión de un análisis de externalidades atmosféricas para cada medida de mitigación evaluada. Calculando los impactos locales en la contaminación atmosférica y bajo la metodología de Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) fue posible evaluar económicamente esta componente del efecto para cada medida.

El desarrollo de este estudio consideró la participación en talleres de 5 de las 7 autoridades sectoriales que tienen como responsabilidad la elaboración de Planes Sectoriales de Mitigación. Por una parte, esto facilitó la incorporación de los PSMs en las proyecciones hasta 2035, pero también permitió levantar las expectativas y visiones de mediano y largo plazo de los ministerios.

Otro sector en que se realizó un importante acercamiento con sus actores fue la minería. Con la participación y apoyo del Ministerio de Minería se realizaron reuniones con el Consejo Minero y de forma bilateral con algunas empresas del sector, con lo cual se pudo alimentar el análisis de prospectivo, con información específica asociada a las potenciales de mitigación del sector, así como las expectativas y visión de corto, mediano y largo plazo de la industria.

### *2.1.1.1 Proyecciones sector energía con medidas*

Para las proyecciones del escenario de mitigación, se simula un conjunto de medidas o acciones de mitigación a contar del año 2025, esto implica un efecto sobre los niveles de actividad, parámetros u otros determinantes de las emisiones de cada categoría del sector.

Para el sector energía, la participación de las medidas de mitigación en el periodo 2020 - 2030 están dadas por los Planes Sectoriales de Mitigación del Ministerio de Energía (PSM Min. Energía), Ministerio de Transporte (PSM MTT), Ministerio de Minería (PSM Min. Minería), Ministerio de Obras Públicas (PSM MOP), y Ministerio de Vivienda y Urbanismo (PSM MINVU). Luego, para el periodo 2030 - 2050 se supuso una trayectoria de las medidas como se muestra en la Tabla 1, con la cual se alcanzaría la carbono neutralidad para el 2050.

Cabe destacar que la trayectoria de las medidas presentadas en la siguiente tabla, tienen un esfuerzo adicional al de los PSM para el periodo 2020 - 2030, esto responde a que con la última información disponible los planes actualmente presentados

## Sistema Nacional de Prospectiva

presentarían un déficit para el cumplimiento de la meta nacional del presupuesto de emisiones de 1.100 Mt CO<sub>2</sub>eq.

Tabla 1: Participación de las medidas de mitigación del sector Energía

Medida		2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>1. Descarbonización de la matriz de generación eléctrica</b>		72%	86%	90%	96%	99%	100%
Esta medida tiene como objetivo descarbonizar la matriz de generación eléctrica. Para lograr esta meta, se considera el retiro y reconversión de las centrales a carbón, el desarrollo de sistemas de almacenamiento y la introducción masiva de energías renovables al Sistema Eléctrico Nacional. La participación de las energías renovables en la generación de energía al 2025 es de un 72% y se proyecta que alcance un 100% al 2050.							
<b>2. Electromovilidad livianos (estándar y prohibición de ventas)</b>	<b>Eléctrico</b>	0,3%	11,4%	29,8%	46,5%	65,0%	81,2%
	<b>Híbrido</b>	0%	0,2%	1,3%	3,2%	4,8%	5,7%
	<b>Reconvertido</b>	0%	8%	13,5%	9,7%	1,8%	0%
Esta medida tiene como objetivo la adopción masiva de vehículos eléctricos, a partir del estándar de rendimiento vehicular, a prohibición de venta de vehículos convencionales y la transformación de vehículos convencionales a vehículos eléctricos. En la tabla se muestra el porcentaje de participación del tipo de vehículo en el parque vehicular. Es importante destacar que los vehículos reconvertidos desaparecen del parque por la chatarrización de estos.							
<b>3. Electromovilidad vehículos medianos</b>	<b>Eléctrico</b>	0%	5%	22%	52,5%	70%	86%
	<b>Híbrido</b>	0,2%	0,8%	1,0%	1,1%	4,7%	5,9%
Al igual que la medida anterior, tiene como objetivo la adopción masiva de vehículos medianos eléctricos. En la tabla se muestra la participación de los vehículos eléctricos e híbridos del parque vehicular proyectado.							
<b>4. Buses eléctricos</b>	<b>RM</b>	50%	75%	100%	100%	100%	100%
	<b>Regiones</b>	0%	5,1%	50%	100%	100%	100%
Adopción masiva de buses eléctricos. En la tabla se presenta la participación de buses eléctricos en el parque de buses.							
<b>5. Taxis eléctricos</b>		0%	25%	67%	100%	100%	11%
Adopción masiva taxis eléctricos. En la tabla se presenta la participación de taxis eléctricos en el parque de taxis.							
<b>6. Electromovilidad - camiones livianos y medianos</b>		1%	20%	25%	30%	35%	50%
Adopción masiva camiones livianos y medianos. En la tabla se presenta la participación de camiones livianos y medianos en el parque de transporte de carga.							
<b>7. Estándar de rendimiento en vehículos pesados</b>		0%	0%	-0%	1%	22,0%	44,2%
Medida regulatoria orientada a mejorar el rendimiento energético de los vehículos pesados mediante el establecimiento de estándares de rendimiento energético para vehículos pesados nuevos que ingresen al mercado nacional. Se modela la participación de camiones y tractocamiones a hidrogeno en el parque de camiones.							
<b>8. Cambio modal a bicicleta</b>	<b>Buses</b>	1,6%	2,7%	1,25%	1,25%	1,25%	1,25%
	<b>Medianos</b>	<0,5%	0,5%	0,8%	2,3%	2,3%	2,3%
	<b>Livianos</b>	<0,5%	0,6%	1,25%	1,25%	1,25%	1,25%
Esta medida se enfoca en el traspaso modal, por tanto, es dependiente del supuesto de que los/as usuarios/as de vehículos particulares, bus y moto se trasladan en bicicleta, optando por un modo							

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
cero emisión. Esta medida considera la operación de un programa de cambio modal con el objetivo de lograr la disminución del uso de transporte privado motorizado, con el objetivo de fomentar el uso de bicicletas y transporte público. En la tabla se muestra el porcentaje de reducción de la demanda por tipo de transporte.							
<b>G. Cambio modal a metro</b>	<20	135	135	135	135	135	
Traspaso modal a metro: De forma similar a la medida anterior, esta medida se sostiene en el traspaso modal, por tanto, es dependiente del supuesto de que los/as usuarios/as provenientes de modos asociados a bus urbano, bus interurbano, vehículos particulares, y motos, serían transportados en los trenes de Metro. Esto implica una mayor eficiencia en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando en particular que estos operan con energía eléctrica y que cuentan con contrato de suministro de energías renovables. Esto genera una disminución en la demanda de vehículos livianos que se muestra en la tabla [millones km/año].							
<b>10. Cambio modal a trenes</b>	<5.000	34.000	34.000	34.000	34.000	34.000	
Esta medida se enfoca en el traspaso modal, por tanto, es dependiente del supuesto de que los/as usuarios/as y la carga proveniente de modos asociados a bus interurbano, vehículos particulares y camiones, serían transportados en trenes. Esto implica una mayor eficiencia en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando además que al año 2027, se asume que todos los servicios ferroviarios de pasajeros contarán con contratos de suministro de energías renovables. Esto genera una disminución en la demanda de vehículos livianos que se muestra en la tabla [miles km/año].							
<b>11. Fomento al uso de energía solar para agua caliente sanitaria (ACS)</b>	0	20	207	280	380	484	
El programa tiene como objetivo la instalación en residencias existentes, tecnologías que aprovechan la energía solar para calentar agua con el fin de satisfacer las necesidades de ACS en aplicaciones domésticas. Estos sistemas utilizan colectores solares para capturar la radiación solar y transferirla al agua, proporcionando una fuente de energía limpia y renovable. En la tabla se muestra la cantidad de instalaciones de SST en viviendas (miles).							
<b>12. Electrificación de fuentes energéticas para usos residenciales</b>	<b>Calefacción</b>	0%	11%	23%	40%	53%	68%
	<b>Cocción</b>	5,5%	8%	15%	23%	40%	54%
	<b>ACS</b>	0%	0%	1%	3%	18%	56%
Reemplazo de equipos de combustión en usos de calefacción, cocción y agua caliente sanitaria (ACS) por equipos eléctricos más eficientes. Esta medida no solo reduce las emisiones de GEI, sino que también disminuye las emisiones de contaminantes locales y la contaminación intradomiciliaria. En la tabla se describe la participación de esa tecnología en las viviendas.							
<b>13. Energía distrital</b>	0	10	60	110	160	210	
Implementación de un sistema de energía distrital se presenta como una medida de mitigación efectiva para reducir tanto la contaminación atmosférica en zonas urbanas como las emisiones de CO <sub>2</sub> del sector de calor y frío. La energía distrital ofrece beneficios como una mayor eficiencia energética, el uso de recursos renovables, una mejor calidad del aire tanto en la ciudad como en el interior de los hogares y una reducción de los costos de calefacción para los usuarios, entre otros. En la tabla se observa la cantidad de viviendas conectados a la red de calefacción distrital (miles).							
<b>14. Implementación de la actualización de la reglamentación térmica</b>	0%	2%	5%	8%	10%	12%	
La medida busca mejorar el confort térmico en viviendas nuevas actualizando las exigencias de la envolvente térmica en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Esta actualización de la RT resultará en mejores condiciones de temperatura, humedad y ventilación dentro de las							

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
viviendas, lo que implicaría una menor demanda de energía útil desde las viviendas. En la tabla se presenta el porcentaje de disminución en la demanda útil de energía.							
<b>15. Reacondicionamiento térmico de viviendas vulnerables</b>	40	40	50	50	50	50	
Esta medida promueve la aislación térmica para mejorar la eficiencia energética de viviendas existentes. El reacondicionamiento térmico de las viviendas se ejecuta a través de un subsidio directo del MINVU, que está destinado a mejorar las condiciones de aislación térmica de las viviendas que fueron construidas hasta 2007, antes de la entrada en vigor de la segunda etapa de la Reglamentación Térmica vigente. En la tabla se muestra la tasa de viviendas reacondicionadas por año (miles).							
<b>16. Fomento a la calefacción eléctrica en el sector comercial.</b>	0%	13%	23%	43%	63%	76%	
Se reemplazará la calefacción en base a gas (natural y licuado) en el comercio, por ejemplo, restaurantes, clínicas, comercios, malls, etc, por equipos de calefacción eléctricos de mayor eficiencia. En la tabla se muestra el porcentaje de aumento de la calefacción eléctrica adicional en el sector comercial.							
<b>17. Fomento a la energía eléctrica en usos motrices en el sector comercial.</b>	0%	11%	22%	34%	45%	56%	
Se reemplazará el uso de diésel por electricidad en usos motrices que involucren fuerzas mecánicas, fijas o móviles, que en el sector comercial es principalmente transporte de carga al interior de los establecimientos. En la tabla se muestra la participación de la electricidad en usos motrices de transporte interno en el sector comercial.							
<b>18. Generación distribuida</b>	0	3.738	4.777	5.100	5.800	6.946	
Se promoverá el uso de energía solar en los consumidores finales (residencial y comercial), contribuyendo a diversificar la matriz energética del país, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y favoreciendo el uso de energía limpia y renovable. En la tabla se muestra la potencia instalada anual adicional de generación distribuida [MW].							
<b>19. Electrificación de usos térmicos.</b>	0%	11,2%	14,2%	18%	22%	27,6%	
Actualmente, se cuenta con la capacidad técnica para electrificar directamente la mayoría del calor necesario para los procesos industriales. Esto puede lograrse utilizando una combinación de tecnologías como bombas de calor industriales y sistemas de calefacción por resistencia eléctrica, tal como las calderas eléctricas. En la tabla se muestra la participación de la electricidad en usos térmicos.							
<b>20. ERNC en usos térmicos.</b>	<b>Industria</b>	0%	5,3%	7,3%	9,3%	11%	13,1%
	<b>Minería</b>	0%	5,3%	7,3%	9,3%	11%	13,1%
La medida toma en cuenta varias opciones tecnológicas, sin embargo, para efectos de modelación y cuantificación de resultados se consideró únicamente sistemas solares térmicos (SST). Medida aplica a industrias varias, minas varias, azúcar, cemento, hierro, pesca, salitre, siderurgia y papel y celulosa. En la tabla se muestra la participación de SST en la energía de procesos de calor y calderas.							
<b>21. Hidrógeno en usos térmicos.</b>	<b>Industria</b>	0%	2%	3%	4,4%	5,8%	9,4%
	<b>Minería</b>	0%	2%	3%	4,4%	5,8%	9,4%
La medida contempla la utilización de hidrogeno como combustible dual en equipos estacionarios en la industria. Medida aplica a industrias varias, minas varias, azúcar, cemento, hierro, pesca, salitre, siderurgia y papel y celulosa. En la tabla se muestra la participación del hidrogeno en usos térmicos.							
<b>22. Electrificación de usos motrices - industria.</b>	0%	6,4%	10,7%	14,6%	17%	21,5%	

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
La medida contempla implementar soluciones que posibiliten la transición de los vehículos de transporte y maquinarias, que actualmente utilizan combustibles fósiles, a una operación eléctrica basada en baterías. En la tabla se muestra el incremento de participación de electricidad en usos motrices por reemplazo de diésel.						
<b>23. Hidrógeno en usos motrices - industria.</b>	0%	0%	0,1%	1,3%	3%	6,9%
La medida contempla la introducción de hidrógeno verde en la Industria a través del uso maquinaria impulsada a partir de la tecnología de celdas de combustible, que busca implementar soluciones que posibiliten la transición de los vehículos de transporte y maquinaria empleados en la industria, que actualmente utilizan combustibles fósiles; a la vez de aprovechar la mayor eficiencia que caracteriza el uso de hidrogeno verde. Medida aplica a industrias varias, azúcar, cemento, hierro, pesca, salitre, siderurgia y papel y celulosa. En la tabla se muestra la participación del hidrogeno en usos motrices.						
<b>24. Camiones CAEX sustentables - minería del cobre</b>	0%	5%	40%	57%	73%	90%
La medida tiene como objetivo promover soluciones que faciliten la transición de los vehículos pesados utilizados en la industria, actualmente dependientes de combustibles fósiles, hacia operaciones basadas en energías sustentables, como la electricidad, el hidrógeno o sistemas híbridos. En la tabla se muestra la trayectoria de participación de camiones CAEX eléctricos.						
<b>25. Reemplazo de diésel convencional por diésel renovable en camiones CAEX - minería del cobre</b>	0%	5%	10%	10%	10%	10%
El diésel renovable es un "drop in fuel" que ya está siendo utilizado como reemplazo del diésel convencional en mezclas de hasta 100% en distintas faenas mineras alrededor del mundo. Para efectos de cálculo del potencial de mitigación e información financiera, se considera el reemplazo de diésel convencional por diésel renovable en camiones CAEX. En la tabla se muestra la participación del uso del diésel renovable en camiones CAEX.						
<b>26. Electrificación de usos motrices - minería.</b>	0%	16,9%	22,3%	28,6%	38%	43%
La electrificación usos motrices en el subsector Minas Varias (que incluye varios tipos de minería tales como Oro, Plata, Plomo, Arcillas, etc.) busca implementar soluciones que posibiliten la transición de los vehículos de transporte y maquinaria empleados en estos procesos productivos, que actualmente utilizan combustibles fósiles, a una operación eléctrica basada en baterías. En la tabla se muestra el incremento de participación de electricidad en usos motrices.						
<b>27. Hidrógeno en usos motrices.</b>	0%	0%	0,04%	3,2%	6%	28,4%
La introducción de hidrógeno en usos motrices para el subsector Minas Varias (que incluye varios tipos de minería tales como Oro, Plata, Plomo, Arcillas, etc.) difíciles de electrificar directamente, busca implementar soluciones que posibiliten la transición de los vehículos de transporte y maquinaria empleados en estos procesos productivos, que actualmente utilizan combustibles fósiles, a una operación eléctrica basada en celdas de combustible con H2 verde						

### 2.1.2 Resultados de proyecciones de GEI en escenarios PSM, PSM (con esfuerzo adicional) y Carbono Neutralidad

En el *Gráfico 2* se muestran los resultados de las emisiones proyectadas del sector desde periodo 2023 al 2030 (considerando que los datos entre 2020 y 2022 corresponden a la última versión del INGEI). Se presentan varias trayectorias totales de emisiones, la

## Sistema Nacional de Prospectiva

línea verde plantea un escenario sin medidas de mitigación, la línea azul un escenario con las medidas y trayectoria de los PSM<sup>2</sup> indicados anteriormente y por último un escenario con esfuerzos adicionales a los PSM representado con una línea marrón.

Es importante destacar que este escenario de PSM con esfuerzos adicionales es un escenario que busca cumplir el compromiso de presupuesto de carbono del periodo 2020-2030, ya que al modelar las medidas de los actuales PSM con las trayectorias ahí establecidas y con la última información disponible, no se alcanza la meta nacional.

El gráfico presenta una disminución sostenida de la sub-categoría 1.A.1 Industrias de la energía, que en el año 2030 genera 5.129 ktCO<sub>2</sub>eq. Sin embargo, las demás categorías presentan un crecimiento sostenido hasta alcanzar un peak entre 2027 y 2029.

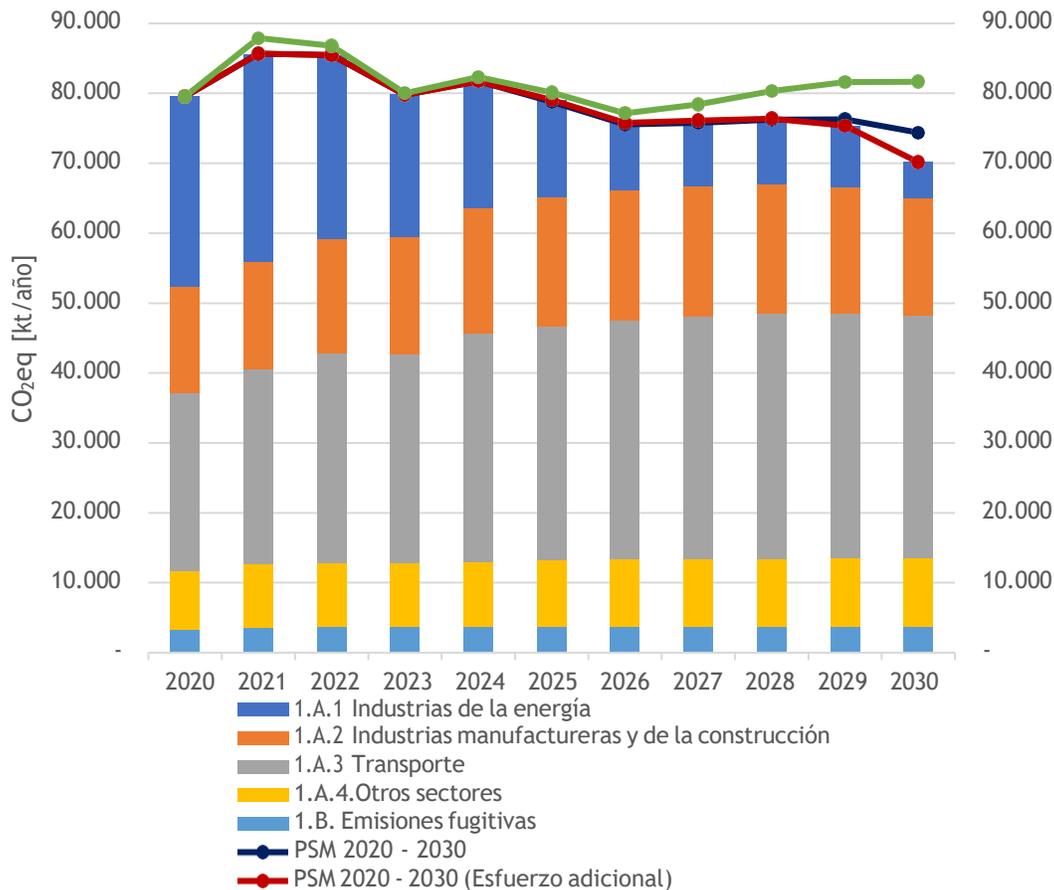


Gráfico 1 Emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de las sub-categorías del sector Energía, período 2020 - 2030.

<sup>2</sup> Según información hasta noviembre de 2024

## Sistema Nacional de Prospectiva

A continuación se muestra el análisis anterior ligado a la proyecciones de emisiones del sector entre 2030 y 2050.

En este escenario en el que se da continuidad a los esfuerzos adicionales de los PSM, llamado Escenario Carbono neutralidad, se observa que a partir del año 2030 los subsectores individualmente contienen su crecimiento y comienza un decrecimiento sostenido de las emisiones de transporte, la industria y los sectores comercial público y residencial en conjunto. De esta forma la mayor parte de las emisiones del 2050 corresponderán a la sub-categoría 1.A.3 Transporte con 16.701 ktCO<sub>2</sub>eq, seguido por las sub-categorías 1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción y 1.A.4 Otros sectores, con 8.059 ktCO<sub>2</sub>eq y 6.610 ktCO<sub>2</sub>eq al 2050 respectivamente.

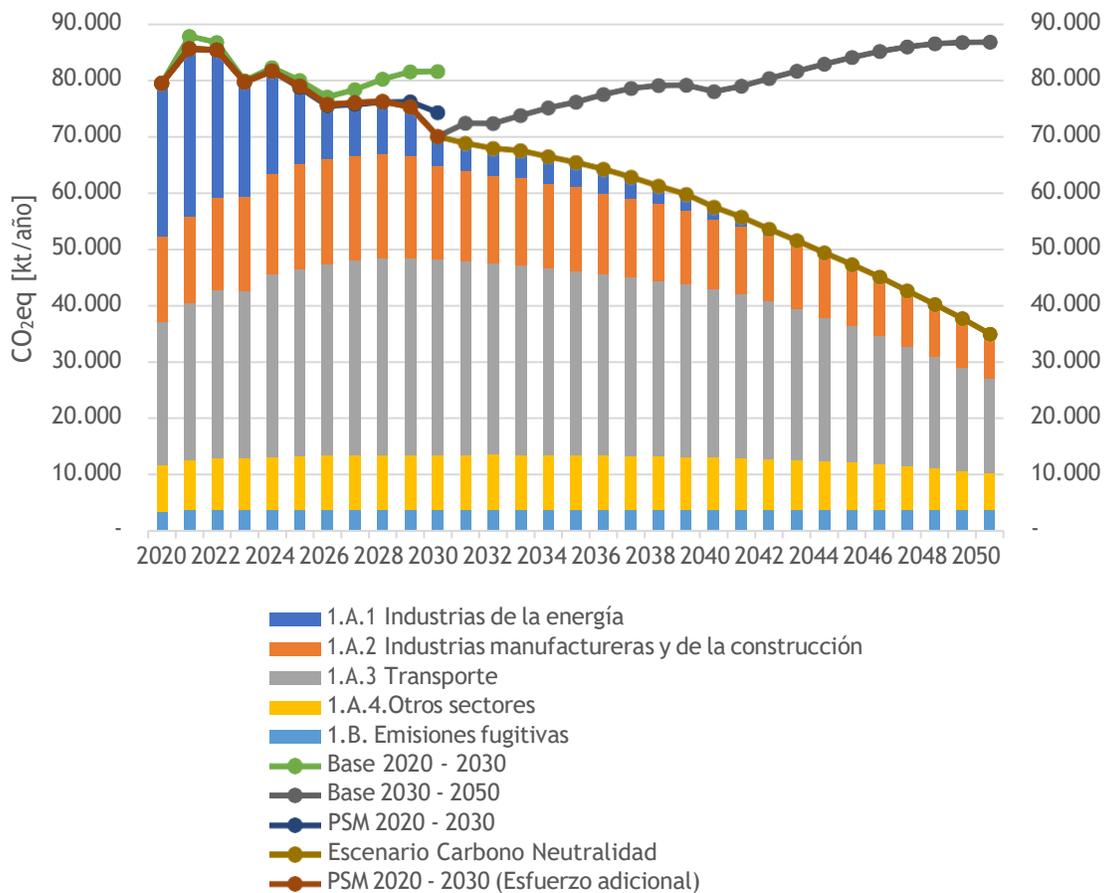


Gráfico 2. Emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de las sub-categorías del sector energía, período 2020 - 2050.

En el Gráfico 5, 4 y 5; se puede observar la disminución paulatina de la participación del sector 1.A.1 Industrias de la energía, en la contribución de emisiones del sector energía, producto de la descarbonización de la matriz energética, así como también el incremento en la participación de la emisión del sector 1.A.3 Transporte; 1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción, y 1.A.4 Otros sectores.

Sistema Nacional de Prospectiva

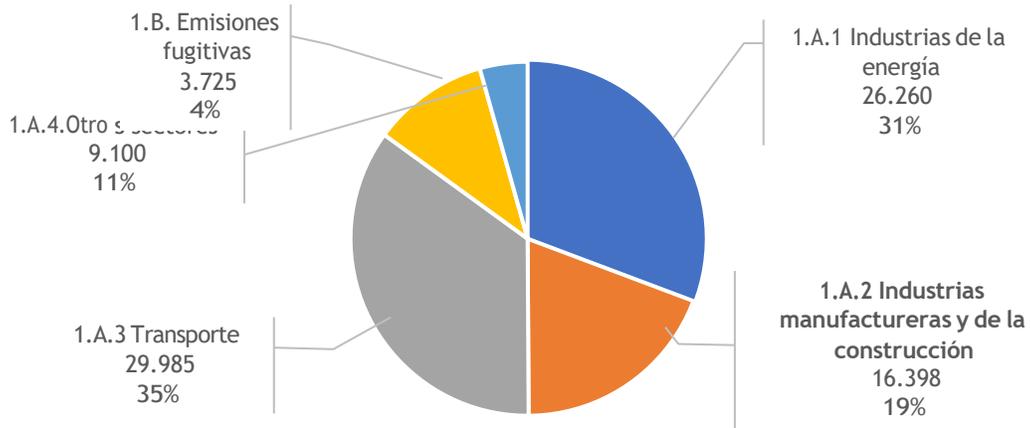


Gráfico 3. Participación de las emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de las sub-categorías del sector energía del año 2022.

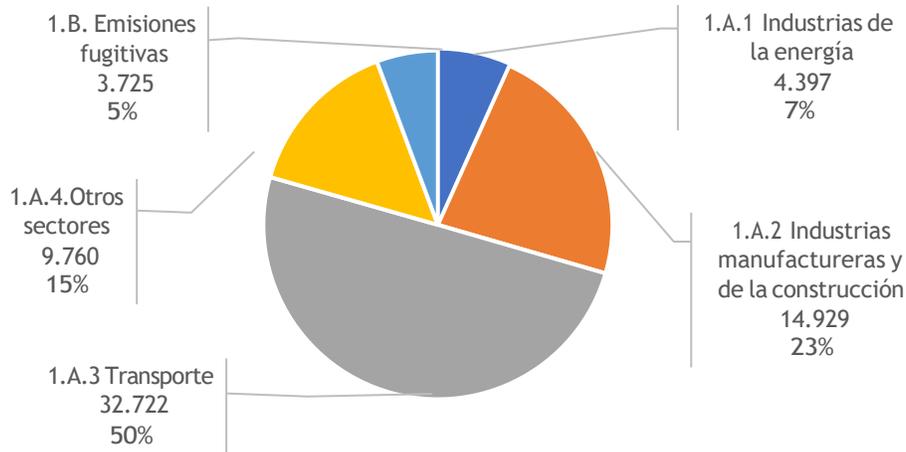


Gráfico 4. Participación de las emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de las sub-categorías del sector energía del año 2035.

## Sistema Nacional de Prospectiva

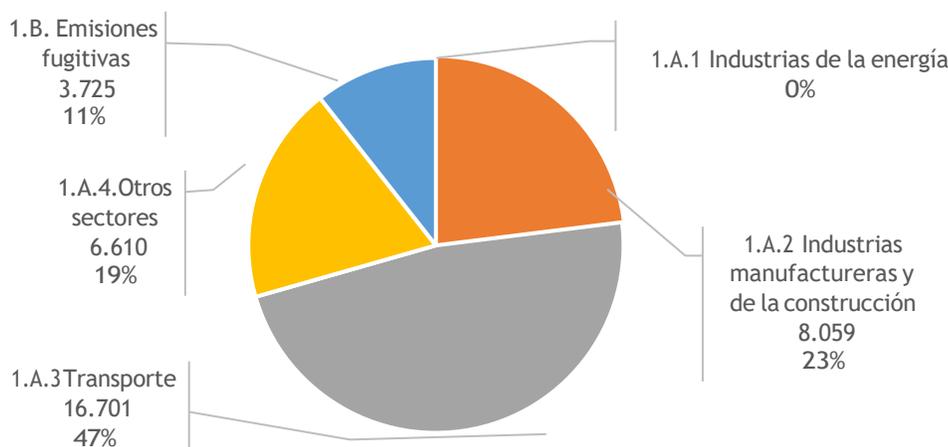


Gráfico 5. Participación de las emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de las sub-categorías del sector energía del año 2050.

## 2.2 Metodología general de sectores no energéticos

### 2.2.1 Drivers para proyección de datos de actividad por sector

Para definir tanto un escenario base como uno con medidas de mitigación, primero es necesario proyectar los datos de actividad. En algunos sectores se hace buscando correlaciones econométricas con indicadores como el PIB o el crecimiento de la población, mientras que en otros se utilizan regresiones basadas en datos históricos para anticipar cómo evolucionarán en el futuro. A continuación, se presentan los drivers utilizados por sector y además la fuente de estos.

Tabla 2. Drivers para proyección sector

Sector	Driver	Fuente	Nivel desagregación
IPPU	Parque vehicular (PIB)	Ministerio de Medio ambiente a partir de datos entregados por la Asociación Nacional de Automotriz de Chile (ANAC), 2024.	Nacional Todos estos drivers en modelo IPPU solo se utilizan a nivel nacional (sin desagregar por tipo o región).
	Viviendas (Población)	Modelo PMR <sup>3</sup> del Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile	
	Penetración aire acondicionado		
	Superficie de supermercados (PIB)		
	Superficie de malls y clínicas (PIB)		

<sup>3</sup> <https://modelopmr.cl/#/acercade>

## Sistema Nacional de Prospectiva

<b>Residuos</b>	Generación residuos (Población)	Proyecciones del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2017	Nacional
<b>Agricultura</b>	Cabezas de animales	Ministerio de Agricultura a partir de datos de Censos Agropecuarios	Nacional
	Consumos fertilizantes		

### 2.2.2 Metodología para la estimación de emisiones de GEI: Directrices del IPCC del 2006 y Refinamiento del 2019

Una vez proyectados los datos de actividad de acuerdo con las tendencias de años anteriores, o bien con relaciones econométricas a partir de los drivers anteriormente mencionados hasta el año 2050. Se estimó las emisiones en cada sector, utilizando las fórmulas de las directrices del IPCC del 2006 y, en caso de ser necesario, del refinamiento del 2019. Para ello se utilizan tanto los datos de actividad obtenidos desde el coordinador del INGEI como los datos proyectados hasta el 2050. Con esos insumos se puede estimar las emisiones de un escenario línea de base hasta el respectivo año, considerando que no ocurren medidas de mitigación (línea base).



Según el INGEI, las emisiones del sector Procesos Industriales y Uso de Producto (IPPU, por su sigla en inglés), consideran las emisiones producidas por una variedad de actividades industriales que transforman materias primas por medios químicos y físicos o que utilizan gases con potencial de calentamiento global para procesos de transferencia de calor u otro fin.

Durante el año 2022, las emisiones de GEI contabilizaron 8.148 ktCO<sub>2</sub>eq, siendo la subcategoría principal el Uso de productos y sustitutos de SAO (2.F) con un 67,8% de la participación del sector, seguido por la categoría Industria de los minerales (2.A) representando un 19,0% de las emisiones del sector; a esta categoriales siguen:

## Sistema Nacional de Prospectiva

Industria de los metales (2.C) e Industria Química (2.B) con un 6% y 2,8% de participación respectivamente. Por último, las categorías Manufactura y utilización de otros productos (2.G) y Productos no energéticos de combustibles y uso de solventes (2.D) representan solo el 2,7% y 1,7% de la participación total del sector.

En términos de gases emitidos en 2022 por este sector, los hidrofluorocarbonos (HFC) son los que contribuyen en mayor porcentaje al total de emisiones del sector con un 67,8%, seguido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) con un 27,6%. El hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) contribuyen 1,9% cada uno y el metano (CH<sub>4</sub>) un 0,7%. Las emisiones de perfluorocarbonos (PFC) se estimaron, pero son menores al 0,01%.

### 2.3.1 Proyección de datos de actividad del sector IPPU

Para proyectar los datos de actividad del sector, para el caso de la producción de cemento como para la producción de vidrio, se realizaron entrevistas a algunos de los principales productores del país además de correlacionar datos de crecimiento de PIB con los de producción de cemento en años previos. En el caso del factor Clinker y la fracción importada, se modeló de acuerdo con los promedios de años previos al 2022.

En el caso de la proyección de producción de cal, al igual que el cemento y el vidrio, se correlacionaron los datos de producción de cal con los de crecimiento de PIB. Y para proyectar la cal en otros usos de carbonatos en procesos, se proyecta con la tendencia de crecimiento del modelo del sector energía.

Para proyectar los datos de producción de ácido nítrico, se correlacionaron datos de producción con la tasa de crecimiento del PIB; y la producción de metanol se proyecta constante, dado que no se observó una tendencia clara ni en la serie en sí misma ni en su relación con otros drivers como el PIB.

Por otra parte, para la proyección de los datos de actividad de la industria de los metales, en particular, producción de hierro y acero, se mantiene constante, dado que no se encuentra correlación significativa con el PIB. En el caso de producción de plomo, por una parte, se considera las metas de gestión de baterías de plomo fuera de uso que serán definidas en la ley REP, y, además, la tendencia a aumentar medidas de electromovilidad puede incrementar el uso de baterías de litio en reemplazo de las baterías de plomo.

Tabla 3: Datos de actividad base del sector IPPU

Dato de actividad	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Fracción Clinker (%)	67	66	66	66	66	66	66

## Sistema Nacional de Prospectiva

Producción de Cemento (kton)	3.802	3.881	4.015	4.154	4.298	4.447	4.601
Producción Cal (kton)	744	850	921	979	1.026	1.061	1.088
Producción Cullet (kton)	367	322	366	406	441	468	491
Producción de Vidrio (kton)	1.088	1.036	1.176	1.305	1.416	1.505	1.576
Cal para Azúcar (kton)	10	10	11	11	11	12	12
Producción de Ácido Nítrico (kton)	675	735	823	896	953	995	1.026
Producción de Metanol (kton)	887	845	845	845	845	845	845
Producción de Hierro (Mt)	701.191	701.191	701.191	701.191	701.191	701.191	701.191
Producción de Cal Hidratada (kton)	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578
Producción de Plomo (kton)	8.555	8.555	8.555	8.555	8.555	8.555	8.555
AA. Est. Equipos (ton)	5.143	7.951	13.791	17.040	18.343	18.945	19.317
AA. Est. Instalaciones (ton)	1.046	1.187	1.413	1.648	1.845	1.983	2.095
AA. Movil (ton)	2.367	2.680	3.215	3.621	3.828	3.958	4.076
Agente Espumante (ton)	3.531	4.395	6.590	8.943	11.243	13.249	14.979
Extinción Fuego (ton)	462	550	771	1.008	1.239	1.439	1.612
Ref. Comercial - Equipos (ton)	783	873	1.083	1.315	1.495	1.615	1.675
Ref. Comercial - in situ (ton)	251	255	263	272	280	284	287
Ref. Domestica (ton)	743	610	263	-	-	-	-
Ref. Industrial (ton)	2.620	3.301	5.110	7.133	9.165	10.971	12.547
Ref. Transporte (ton)	37	37	37	37	37	37	37

Como se puede observar, la producción de cemento muestra una tendencia al alza, pasando de 3.802 kton en 2022 a 4.601 kton en 2050, mientras que la fracción de clínker se mantiene relativamente constante en torno al 66%, luego de una leve disminución inicial desde 67%. En el caso de la producción de vidrio, se observa una

## Sistema Nacional de Prospectiva

caída inicial desde 1.088 kton en 2022 a 1.036 kton en 2025, seguida de un incremento sostenido hasta alcanzar 1.576 kton en 2050. Por otro lado, las variables vinculadas a la utilización de gases refrigerantes, como la refrigeración doméstica, presentan una reducción progresiva hasta alcanzar cero en 2040, lo cual refleja la implementación de la enmienda de Kigali del Protocolo de Montreal.

### 2.3.2 Proyecciones IPPU escenario base

Del Gráfico 6 se observa un crecimiento progresivo en las emisiones totales hasta alcanzar un máximo alrededor del año 2030, superando las 9.500 ktCO<sub>2</sub>eq/año, seguido de una marcada disminución hacia 2050, donde las emisiones proyectadas bajan a menos de 5.000 ktCO<sub>2</sub>eq/año.

La mayor contribución a las emisiones del sector IPPU proviene consistentemente de la categoría 2.A Industria de los minerales, impulsada principalmente por la producción creciente de cemento, cal y vidrio, como se observa en las proyecciones de actividad. En particular, la producción de cemento muestra un aumento sostenido en el tiempo, aunque mitigado parcialmente por la reducción progresiva del factor clínker —pasando de 66% a 55% al 2035— medida que disminuye la intensidad de emisiones por unidad de cemento producido.

En segundo lugar, en importancia se encuentra la categoría 2.F Uso de productos y sustitutos de sustancias que agotan la capa de ozono, que presenta una dinámica más compleja. Si bien inicialmente mantiene niveles altos de emisiones, a partir de 2030 comienza una disminución significativa debido a varios factores. Esta tendencia responde, en gran parte, a la implementación progresiva de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, que establece restricciones al consumo y producción de hidrofluorocarbonos (HFC) de alto potencial de calentamiento global. Sin embargo, el efecto de esta reducción no es inmediato: las emisiones de HFC están asociadas principalmente a fugas durante la vida útil y al desecho final de los equipos existentes, instalados muchos años antes, por lo que persiste un desfase antes de observar reducciones sustanciales.

A nivel de medidas de mitigación específicas, esta caída se ve reforzada por varias acciones modeladas: (i) la Norma de emisión de HFC para grandes usuarios de sistemas de refrigeración y climatización, que reduce las fugas a partir de 2028; (ii) el aumento progresivo de nuevas plantas de reciclaje y regeneración de HFC, cuya capacidad alcanza el 80% para 2045; y (iii) la prohibición del uso de refrigerantes de alto PCG en distintos sectores (industrial, aire acondicionado estacionario y comercial), sustituyendo gradualmente los refrigerantes tradicionales por alternativas

## Sistema Nacional de Prospectiva

de menor impacto climático. Estas medidas, en conjunto, explican la marcada disminución de emisiones proyectada en la categoría 2.F a partir de la década de 2030.

Por otro lado, otros subsectores como 2.B Industria química (principalmente producción de ácido nítrico) y 2.D Uso de solventes mantienen una participación menor pero relativamente constante a lo largo del período. Finalmente, las emisiones de 2.C Industria de los metales y 2.G Manufactura y utilización de otros productos se mantienen en niveles marginales respecto de las principales categorías mencionadas.

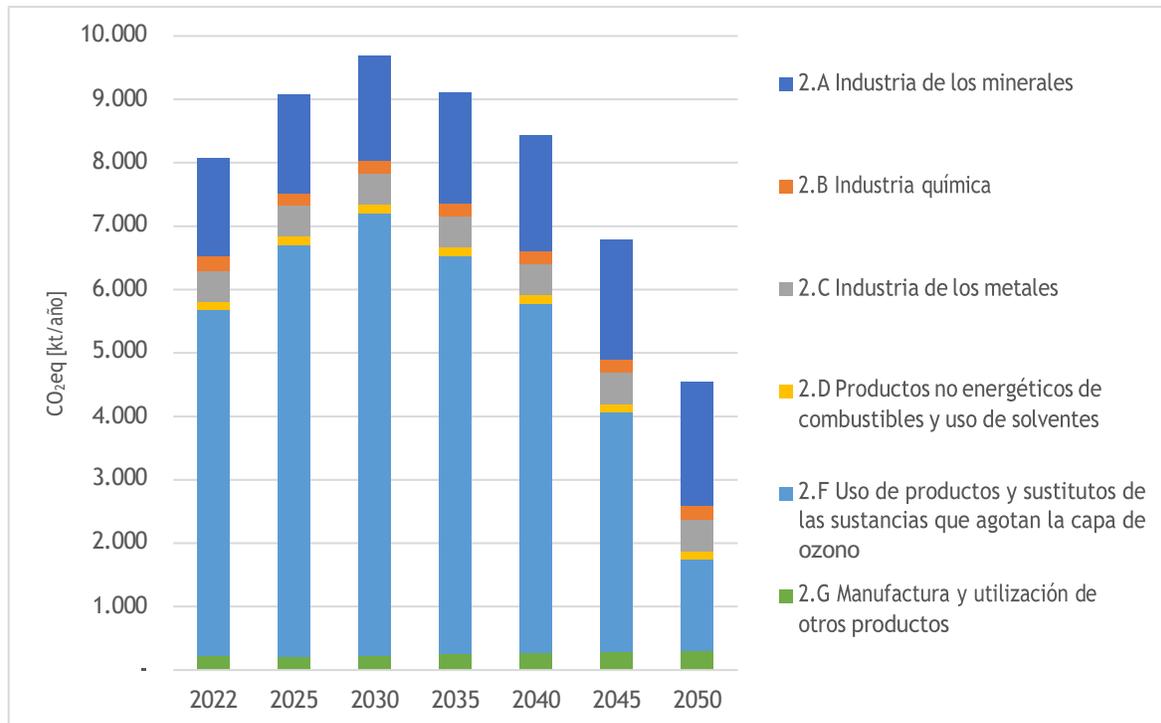


Gráfico c. Emisiones de GEI escenario base del sector IPPU.

### 2.3.3 Proyecciones IPPU escenario con medidas

Para las proyecciones del escenario con medidas, se simula un conjunto de medidas o acciones de mitigación a contar del año 2025, esto implica un efecto sobre los niveles de actividad, parámetros u otros determinantes de las emisiones de cada categoría del sector.

Tabla 4. Medidas de mitigación del sector IPPU

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>1. Reducción del Factor Clínter en producción de cemento</b>						
<b>Factor clínter</b>	66%	60%	55%	55%	55%	55%
Se reducirá el uso de Clínter como materia prima en la producción de cemento, modelando un reemplazo por otras materias primas, suponiendo que dichas materias primas no requieran de un						

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
proceso de calcinación. De esta forma, el factor se reduce a un 60% en 2030, para luego alcanzar un 55% en 2035 y mantenerse constante hasta el 2050.						
<b>2. Norma de emisión de HFC</b>						
Ref. comercial - Equipos e in situ	0%					30%
Ref. industrial	0%					42%
Se implementará una nueva norma de emisión de HFC para grandes usuarios de sistemas de frío, ya sea de refrigeración o de climatización. Se considera que esta norma de emisión comenzará a tener efecto en la reducción de emisiones desde el año 2028. Para todo el periodo desde 2030, se consideran reducciones en emisiones de un 30% y 42%, aplicadas a un 70% de los establecimientos. Esta medida se considera como un “adelantamiento” de acciones que posteriormente serán restringidas por la implementación de los límites asociados a la enmienda de Kigali.						
<b>3. Nuevas plantas de reciclaje y regeneración de HFC (FdP)</b>						
Factor de planta de plantas de reciclaje y regeneración	0,5%	10%	40%	60%		80%
En esta medida se modela la operación de nuevas plantas de reciclaje y regeneración de HFC <sup>4</sup> . El factor de planta de estas plantas de reciclaje empieza a aumentar linealmente desde 2021 hasta alcanzar un 10% en 2030. Luego el factor de planta sube a un 20% desde 2031, hasta alcanzar un 80% en 2045. Se asume que el factor de planta crece desde el 2030, y que entran 2 plantas nuevas de capacidad 700 ton/año cada una en 2035 y 2045. En la tabla se presenta la trayectoria de los factores de planta.						
<b>4. Prohibición uso de refrigerantes con alto PCG</b>						
Ref. Industrial	0%	82%	82%	82%	82%	82%
AA. estacionario	25%	72%	95%	100%	100%	100%
Ref. Comercial equipos	0%	70%	100%	100%	100%	100%
AA. Comercial in situ	0%	0%	70%	70%	70%	70%
Esta medida corresponde a la prohibición del uso de refrigerantes con alto PCG, y se modela como una variación en la distribución de refrigerante utilizados a otro de menor PCG. En la tabla se presenta el incremento de la participación de refrigerantes con menor PCG por aplicación. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Para Ref. industrial se modela un incremento de HFC-152a y disminución de R507a.</li> <li>- Para el AA. Estacionario se modela un incremento de R410a por HFC-32 y disminución de R410a.</li> <li>- Para la Ref. Comercial-equipos se modela un incremento de HFC-134a por HFC-152a desde 2030, y luego un reemplazo total por HFC-152a al 2050.</li> <li>- Para AA. Comercial in situ se modela un incremento de HFC.-152a y disminución de R507a.</li> </ul>						
<b>5. Prohibición de SF<sub>6</sub> en la manufactura de equipos eléctricos</b>						
Reducción de emisiones SF <sub>6</sub>	0%					100%

<sup>4</sup> Se entiende por **reciclaje** de HFC un procedimiento básico de limpieza de estos gases fluorados, mientras que la **regeneración** consiste en un tratamiento que logra que los HFC actúen como sustancias vírgenes. Ambos procesos requieren de una **recuperación** previa, que es el proceso de recogida y almacenamiento de HFC durante el mantenimiento de sistemas, revisión o eliminación de productos o aparatos.

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Se modela la prohibición total del SF <sub>6</sub> en la manufactura de equipos eléctricos, lo que corresponde a la instalación de nuevos equipos eléctricos desde el 2030. En la tabla se muestra el porcentaje de implementación de la medida.						

Según la modelación de las medidas y como se observa en el Gráfico 7, partir de 2030 se observa una disminución progresiva de las emisiones, producto de la aplicación escalonada de un conjunto de medidas dirigidas a subsectores clave como la industria del cemento, la climatización, la refrigeración industrial y comercial, y el uso de gases industriales de alto potencial de calentamiento global.

Una de las principales reducciones es en la industria de los minerales (2.A), debido a la disminución del factor de clínker en la producción de cemento, que baja desde un 66% en 2025 hasta estabilizarse en 55% desde 2035 en adelante. Esta medida reduce considerablemente las emisiones por descarbonatación, al reemplazar parcialmente el clínker con materias primas que no requieren calcinación.

Otra disminución significativa ocurre en la categoría 2.F Uso de productos y sustitutos de las sustancias que agotan la capa de ozono, impulsada por tres medidas principales:

1. La implementación de una norma de emisión de HFC para grandes usuarios de sistemas de frío, que entra en vigor en 2028 y se refleja en una reducción del 30% en refrigeración comercial y 42% en refrigeración industrial desde 2030.
2. La instalación progresiva de plantas de reciclaje y regeneración de HFC, cuyo factor de planta crece desde 0,5% en 2025 hasta 80% en 2045, favoreciendo la reutilización de refrigerantes y reduciendo la demanda de nuevas sustancias.
3. La prohibición del uso de refrigerantes con alto PCG, con una implementación paulatina por tipo de aplicación: desde 2025 en aire acondicionado estacionario, desde 2030 en refrigeración comercial por equipos, y desde 2035 en refrigeración comercial in situ, alcanzando hasta un 100% de sustitución en varios usos al 2050.

Adicionalmente, se refleja la eliminación total del uso de SF<sub>6</sub> en la manufactura de equipos eléctricos a partir de 2030, medida que afecta emisiones en subcategorías puntuales dentro del sector.

## Sistema Nacional de Prospectiva

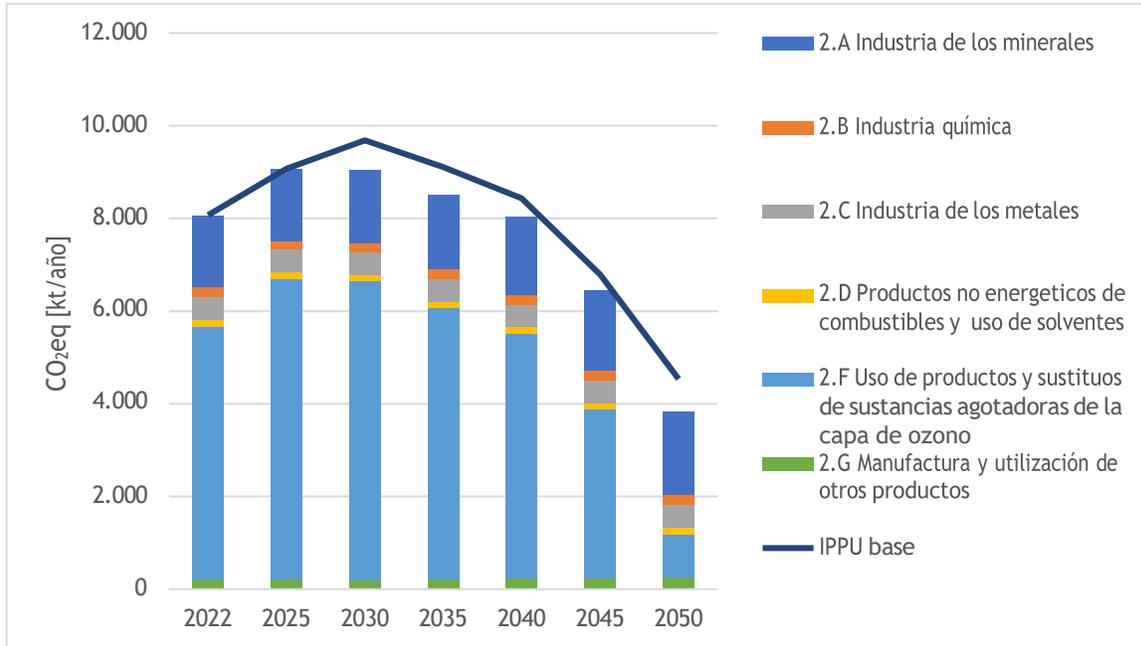


Gráfico 7. Emisiones de GEI escenario con medidas del sector IPPU.



De acuerdo con INGEI, las emisiones del sector agricultura provienen principalmente de procesos digestivos de animales, producción de cultivos destinados a consumo animal y humano, ciclo del nitrógeno en procesos de fertilización, excreción de nitrógeno en la pradera por animales de pastoreo o quemas de residuos agrícolas. Estas fuentes de emisiones son categorizadas en el INGEI como Fermentación Entérica (3.A), Gestión de estiércol (3.B), Cultivos de arroz (3.C), Suelos agrícolas (3.D), Quemas de residuos agrícolas en el campo (3.F), Encalado (3.G) y Aplicación de urea (3.H). Según los datos estimados en el INGEI, el 52,2% de las emisiones corresponden a la categoría fermentación entérica; seguido por la categoría suelos agrícolas con un 29,7%; gestión de estiércol con un 10,6%; aplicación de urea con un 3,2%; cultivo de arroz con un 1,5%; quema de residuos agrícolas en el campo con un 1,5%; y finalmente, encalado con un 1,4%.

## Sistema Nacional de Prospectiva

Los principales gases emitidos en 2022 por este sector son el metano (CH<sub>4</sub>) con un 61,3% de la participación total; seguido por óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) con un 34%; y por último, con una pequeña participación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) representando un 4,6%.

### 2.4.1 Proyección de datos de actividad del sector Agricultura

En el caso de los datos de actividad del sector agricultura entre 2022 y 2050 muestran dinámicas relevantes para la estimación de emisiones. En cuanto a la población de porcinos, se observa un crecimiento sostenido desde 2.744 mil cabezas en 2022 hasta 3.832 mil en 2050, lo que implica una presión creciente sobre las emisiones asociadas al manejo de estiércol, aunque también representa una oportunidad para tecnologías como los biodigestores. En contraste, la categoría otros bovinos disminuye marcadamente en los primeros años, pasando de 1.472 mil cabezas en 2022 a 1.104 mil desde 2030 en adelante, estabilizándose en ese nivel. Esto podría reflejar un cambio en los patrones productivos ganaderos. Por otro lado, el consumo nacional de fertilizantes aumenta progresivamente desde 226 kton en 2022 hasta 287 kton en 2050, lo que sugiere una mayor intensificación agrícola, con impactos directos sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) en suelos agrícolas. Estas tendencias permiten modelar la evolución esperada de las emisiones bajo un escenario sin medidas y evaluar el impacto potencial de intervenciones como el uso eficiente de fertilizantes o cambios en la dieta del ganado.

Tabla 5: Datos de actividad base del sector Agricultura

Dato de actividad	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Vacas Lecheras (miles)	363	363	363	363	363	363	363
Terneros (miles)	639	559	479	479	479	479	479
Otros bovinos (miles)	1.472	1.288	1.104	1.104	1.104	1.104	1.104
Porcinos (miles)	2.744	2.943	3.216	3.430	3.598	3.729	3.832
Aves de corral (miles)	61.889	63.417	64.081	64.192	64.211	64.214	64.214
Otros animales (miles)	3.081	1.554	890	779	760	757	756
Superficie cultivada de arroz (ha)	20.712	23.907	23.741	23.762	23.772	23.774	23.774
Consumo de fertilizante nacional (kton)	226	269	274	278	281	284	287
Nitrógeno incorporado al suelo desde residuos de cultivos (kton)	130	140	147	150	152	153	154
Suelos orgánicos gestionados (ha)	1.362	3.303	3.267	3.292	3.300	3.302	3.302
Lodos (ton)	2.620	2.162	2.200	2.189	2.191	2.191	2.191

## Sistema Nacional de Prospectiva

### 2.4.2 Proyección Agricultura escenario base

Como se puede observar en el Gráfico 8 durante todo el período, las emisiones totales del sector se mantienen relativamente estables, con valores cercanos a los 9.000 ktCO<sub>2</sub>eq/año. La mayor contribución proviene de la categoría fermentación entérica (3.A), que representa consistentemente más de la mitad de las emisiones del sector. Este comportamiento se explica principalmente por el número constante de vacas lecheras (363 mil cabezas) y por una población de otros bovinos que, aunque disminuye hacia 2030, se estabiliza en torno a 1,1 millones de cabezas hacia 2035. En segundo lugar, destaca la gestión del estiércol (3.B), cuyas emisiones aumentan levemente en línea con el crecimiento proyectado de porcinos (de 2,7 a 3,8 millones) y aves de corral (más de 64 millones a partir de 2030).

La categoría suelos agrícolas (3.D) también muestra una participación significativa y una tendencia ligeramente ascendente, impulsada por el aumento en el uso de fertilizantes (de 226 a 287 kton) y el aporte de nitrógeno desde residuos de cultivos. Las emisiones por cultivo de arroz (3.C) permanecen constantes, coherentes con una superficie cultivada estable en torno a 23.700 ha desde 2025. Por su parte, las emisiones de quema de residuos agrícolas (3.F), encalado (3.G) y aplicación de urea (3.H) son menores en magnitud y no presentan variaciones relevantes a lo largo del período.

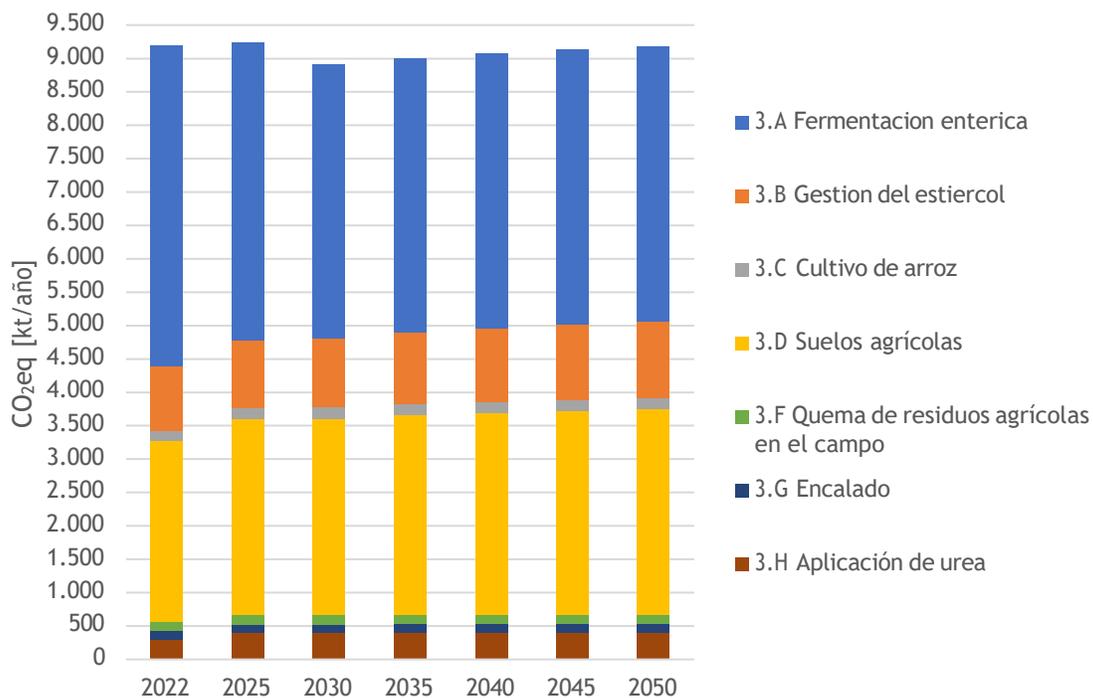


Gráfico 8. Emisiones de GEI escenario base del sector Agricultura

## Sistema Nacional de Prospectiva

### 2.4.3 Proyección Agricultura escenario con medidas

Para las proyecciones del escenario con medidas, se simula un conjunto de medidas o acciones de mitigación a contar del año 2025, esto implica un efecto sobre los niveles de actividad, parámetros u otros determinantes de las emisiones de cada categoría del sector.

Tabla c. Medidas de mitigación del sector Agricultura

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>1. Biodigestores de purines porcinos</b>	23%	42%	56%	75%	75%	75%
Se incrementará a participación de biodigestores como sistema de tratamiento de los purines, ya que es un sistema de tratamiento que genera menos emisiones, contribuyendo en la disminución de emisiones de metano desde los planteles porcinos. Actualmente estos sistemas de tratamiento ya se encuentran instalados en algunos planteles, a pesar de esto, se plantea que esta tecnología alcance una participación del 42% del total de sistemas de tratamientos de purines para el 2030, y un 75% al 2040.						
<b>2. Uso eficiente de fertilizantes</b>	Cereales	0%	10%	15%	20%	20%
	Cultivos industriales	0%	8%	13%	15%	15%
	Forrajeras	0%	8%	13%	15%	15%
Se reducirá en la intensidad de uso de fertilizantes de un 10% en el cultivo de cereales y de un 8% en los cultivos industriales y forrajeras para el año 2030, alcanzando una reducción del 15% del uso de fertilizantes para el 2050 en cultivos industriales y forrajeras, y un 20% en cereales.						
<b>3. Biodigestores de purines bovinos</b>	1%	10%	30%	50%	60%	70%
Se incrementará la participación de biodigestores como sistema de tratamiento del estiércol de bovinos confinados dado que es un sistema que genera menos emisiones que el almacenaje de sólidos y líquido-fango, que son los actuales sistemas de tratamiento del estiércol. Se parte con un nivel de implementación del 1% de este sistema de tratamiento, alcanzando un 70% al 2050.						
<b>4. Mejoramiento en dieta bovina</b>	1%	10%	20%	30%	40%	50%
Las vacas lecheras confinadas a nivel nacional recibirán un aditivo de que inhibe la generación de metano en el proceso de fermentación en un 30%. Se parte con un nivel de implementación donde el 1% de la población de vacas lecheras recibe este aditivo en la dieta, alcanzando un 50% al 2050.						
<b>5. Reducción de quemas agrícolas</b>	1%	30%	40%	50%	50%	50%
En el 100% de las comunas entre el Maule y la Araucanía se aplican acciones de transferencia tecnológica de alternativas de manejo y uso de residuos silvoagropecuarios. Esto permitirá reducir las superficies destinadas a quemas agrícolas en un 30% al 2030 y un 50% desde el 2040.						
<b>6. Arroz bajo en metano</b>	1%	10%	30%	50%	60%	70%
Se emplearán sistemas bajos en emisiones y/o variedades que requieren menor consumo hídrico en el 10% de la superficie destinada al 2030, alcanzando un 70% de la superficie al 2050.						

Como se observa en el Gráfico 9, En la categoría gestión del estiércol (3.B), la reducción de emisiones se debe en gran parte a la expansión del uso de biodigestores en planteles porcinos y bovinos. En el caso de los porcinos, la participación de esta

## Sistema Nacional de Prospectiva

tecnología aumenta desde un 23% en 2025 a un 75% en 2040, mientras que, en bovinos confinados, la penetración crece desde un nivel inicial del 1% en 2025 hasta un 70% al 2050. Estos sistemas permiten capturar metano generado durante el tratamiento del estiércol, evitando su liberación directa a la atmósfera.

En la categoría fermentación entérica (3.A), la disminución se explica por la adopción gradual de mejoras en la dieta bovina, particularmente en vacas lecheras confinadas. Estas mejoras consisten en la inclusión de aditivos que inhiben la producción de metano durante el proceso digestivo. Su implementación se inicia en 2025 con apenas un 1% de cobertura y alcanza el 50% al 2050, reduciendo significativamente las emisiones en esta categoría.

Por su parte, la categoría suelos agrícolas (3.D) se ve influida por la aplicación de la medida de uso eficiente de fertilizantes, que reduce la intensidad de uso de estos insumos en distintos tipos de cultivo. La reducción proyectada alcanza un 20% en cereales y un 15% en cultivos industriales y forrajeros al 2050, lo que contribuye a disminuir las emisiones de N<sub>2</sub>O derivadas del exceso de nitrógeno en los suelos.

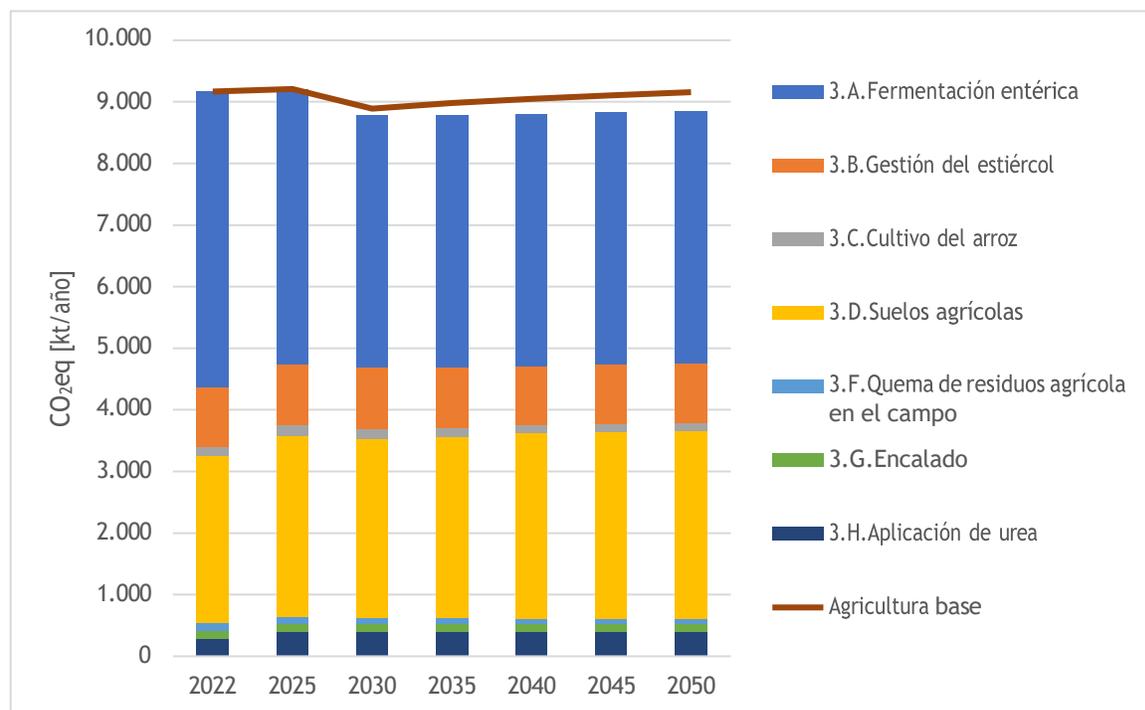


Gráfico 5. Emisiones de GEI escenario con medidas del sector Agricultura



### 2.5 Sector UTCUTS para la NDC 2025

Las emisiones y absorciones de GEI del sector Uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS) son resultado del uso, y gestión del uso de la tierra. Actualmente se reportan las emisiones y absorciones de los siguientes depósitos de carbono: Biomasa (área y subterránea), materia orgánica muerta (madera muerta y hojarasca), materia orgánica del suelo y productos de la madera recolectada.

No se cuenta con información para cuantificar la superficie de suelos orgánicos presentes en el país, por esta razón hasta la fecha se considera las estimaciones de suelos minerales y el avance de la detección de suelos orgánicos forma parte del plan de mejoramiento del inventario sectorial.

Además, para las seis categorías de uso de acuerdo con las Directrices del IPCC de 2006: Tierras forestales (4.A), Tierras de cultivo (4.B), Pastizales (4.C), Humedales (4.D), Asentamientos (4.E), Otras tierras (4.F) y Productos de madera recolectada (4.G); se consideran los gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Es importante mencionar que también, Cada categoría de uso se subdivide en tierras que permanecen como tales y tierras convertidas a otra categoría, las que se informan durante 20 años como convertidas y luego como permanentes: Tierras que permanecen como tales (4.A.1 - 4.F.1) que son tierras que no experimentan cambios de uso y permanecen en su categoría; y Tierras convertidas a otra categoría (4.A.2 - 4.F.2), que son tierras desde el momento de la conversión se informan en la categoría a la que se convirtieron durante un periodo de transición de 20 años; luego de esos 20 años se informan en la subcategoría como tierras que permanecen como tal.

Según el INGEI, en el 2022 el sector UTCUTS representó un 34% del balance de GEI, contabilizando -56.678,8 ktCO<sub>2</sub>eq. Al existir emisiones y absorciones en el sector, la participación de las categorías se divide entre las que emiten y absorben; en el caso de las absorciones las categorías Tierras Forestales y los Productos de madera representan el 90,4% y 9,6% de las absorciones respectivamente; y para las emisiones las categorías Tierras de cultivo y Pastizales representan el 39% y 30,8% cada una, y por ultimo las categorías Asentamientos y Humedales participan en menor medida con un 29,6% y 0,6% respectivamente.

## Sistema Nacional de Prospectiva

El principal GEI de las emisiones y absorciones en términos absolutos fue el CO<sub>2</sub>, representado un 98,6% del sector; lo sigue el CH<sub>4</sub> con un 0,8% y el N<sub>2</sub>O con un 0,6% de participación.

### 2.5.1 Proyección de datos de actividad del sector UTCUTS

Para proyectar los datos de actividad de este sector, se realizó una modelación de series de tiempo por medio de los modelos de Vectores Auto Regresivos (VAR) y Modelos Auto regresivos Integrados de Media Móvil (ARIMA). Estos modelos proyectan el desempeño futuro del dato de actividad de acuerdo con comportamiento pasado.

Además, utilizaron un modelo propio de INFOR para proyectar la evolución de renovales y bosque nativo de áreas de conservación, que se basa en principios del INGEI, donde los bosques se mantienen bajo crecimiento hasta alcanzar los 60 cm de diámetro medio cuadrático, luego de superar ese diámetro, pasan a ser bosque en equilibrio.

Para el sector UTCUTS entre 2022 y 2050 las plantaciones forestales muestran una leve pero continua disminución, bajando desde 2.573 mil hectáreas en 2022 hasta 2.247 mil hectáreas en 2050, lo cual podría estar relacionado con restricciones de expansión o priorización de otros tipos de cobertura vegetal. En cuanto a los planes de manejo, se aprecia una fuerte caída desde 95 mil hectáreas en 2022 a solo 17 mil a partir de 2025, manteniéndose constantes hasta 2050, lo que podría indicar una consolidación de estrategias de manejo o una redefinición de su alcance. El uso de leña, expresado en miles de metros cúbicos, disminuye drásticamente desde 26.529 mil m<sup>3</sup> en 2022 a alrededor de 12.433 mil m<sup>3</sup> en 2050, lo que representa un cambio significativo con posibles beneficios en reducción de emisiones y degradación. Por otro lado, las áreas afectadas por incendios fluctúan marcadamente, con un máximo inicial de 54.560 ha en 2022 y variaciones importantes en los años posteriores, reflejando una incertidumbre inherente al riesgo climático y a factores de gestión del fuego.

Tabla 7: Datos de actividad base del sector UTCUTS

Dato de actividad	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Parques nacionales y reservas (miles de ha)	2.040	2.038	2.038	2.037	2.037	2.036	2.036.
Planes de Manejo (miles de ha)	95	17	17	17	17	17	17
Plantaciones forestales (miles de ha)	2.573	2.250	2.249	2.249	2.248	2.248	2.247
Renovales (miles de ha)	6.250	6.248	6.247	6.246	6.245	6.244	6.244
Cosechas (miles de m3)	40.551	40.775	40.298	40.770	40.304	40.765	40.309
Leña (miles de m3)	26.529	12.723	12.584	12.496	12.451	12.434	12.433
Incendios (ha)	54.560	7.192	14.220	9.963	6.319	10.293	9.896

## Sistema Nacional de Prospectiva

### 2.5.2 Proyección UTCUTS escenario base

Como se observa en el Gráfico 10, la categoría predominante es 4.A Tierras forestales, que representa casi la totalidad de las remociones de CO<sub>2</sub> a lo largo del período, cayendo valores cercanos a las -50.000 ktCO<sub>2</sub>eq/año hacia 2050. Esta remoción está asociada principalmente al crecimiento de biomasa en bosques nativos y plantaciones forestales. Por el contrario, otras categorías como tierras de cultivo (4.B), asentamientos (4.E) y productos de madera recolectada (4.G) tienen un aporte mucho menor y en general positivo, es decir, representan fuentes de emisión, aunque con magnitudes marginales frente al balance total del sector.

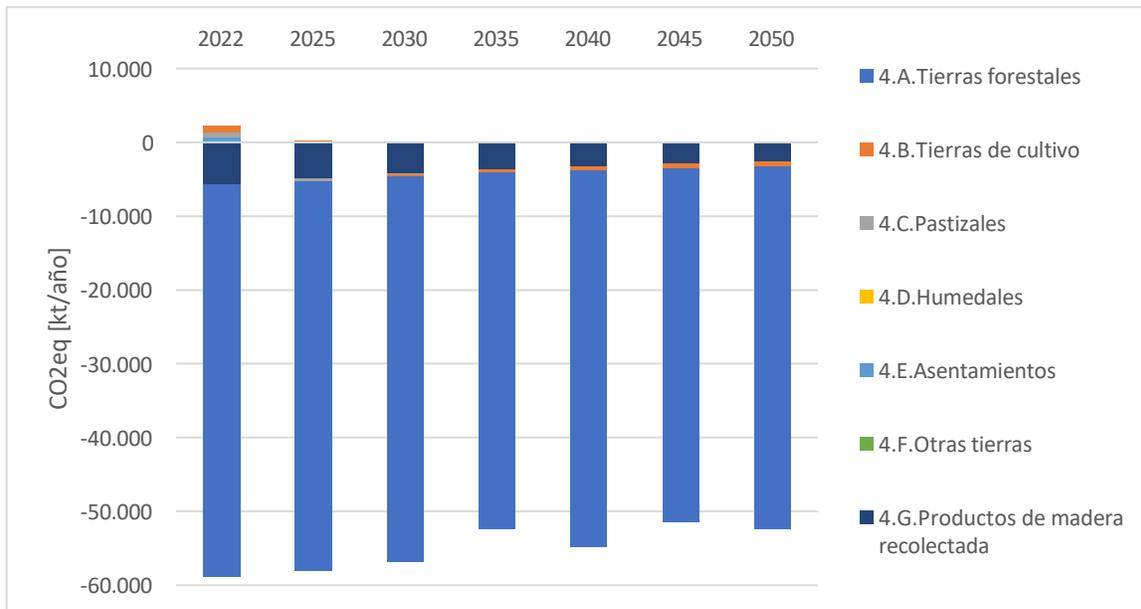


Gráfico 10. Emisiones de GEI escenario base del sector UTCUTS

### 2.5.3 Proyección UTCUTS escenario con medidas

Para las proyecciones del escenario con medidas, se simula un conjunto de medidas o acciones de mitigación a contar del año 2025, esto implica un efecto sobre los niveles de actividad, parámetros u otros determinantes de las emisiones de cada categoría del sector.

Tabla 8. Medidas de mitigación del sector UTCUTS

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1. Forestación (ha)		200.000				100.000

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2025	2030	2035	2040	2045	2050
La medida de forestación considera la plantación de 200.000 hectáreas entre 2020 y 2030, en cumplimiento del compromiso establecido en la NDC vigente de Chile. Esta superficie contempla una proporción de 70% especies nativas y 30% exóticas, y se implementará principalmente en suelos con aptitud forestal y en áreas prioritarias para la conservación. La estimación se basa en estudios desarrollados por INFOR (2022 y 2015), que incluyen plantaciones productivas de eucalipto, pino radiata (parte de ellas como cubierta permanente) y especies nativas, distribuidas progresivamente entre 2025 y 2030. En la tabla se detallan los valores acumulados de forestación por periodo 2020 - 2030 y 2031 - 2050.						
<b>2. Manejo bosque nativo (ha)</b>		200.000				178.400
Para efecto de la modelación de la NDC se mantiene la misma proporción que se ve en la línea base del país, 70 % de la superficie que se maneja se realiza en renovales y 30 % corresponde a actividades de recuperación. En la tabla se presenta la proyección de hectáreas						

De acuerdo con el Gráfico 11, la principal fuente de remociones corresponde a la categoría 4.A Tierras forestales, que domina el balance total del sector. Sin embargo, fenómenos como la degradación forestal y la deforestación mantienen una tendencia decreciente en las remociones del sector. Si bien en la actualidad el sector alcanza remociones cercanas a 60 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq, en un escenario tendencial este valor podría descender a niveles en torno a 50 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq.

Las acciones de mitigación modeladas de manejo forestal y forestación permiten recortar la caída de las capturas del sector, pero serían insuficientes para estabilizar las remociones. Visualmente, la diferencia se manifiesta en la mayor longitud de las barras azules en el gráfico con medidas (4.A Tierras forestales), lo que indica un crecimiento adicional en las remociones atribuibles a las acciones implementadas. También se aprecia una leve intensificación en las remociones por la categoría 4.G Productos de madera recolectada, reflejo del mejor aprovechamiento y uso prolongado de biomasa forestal.

## Sistema Nacional de Proyectiva

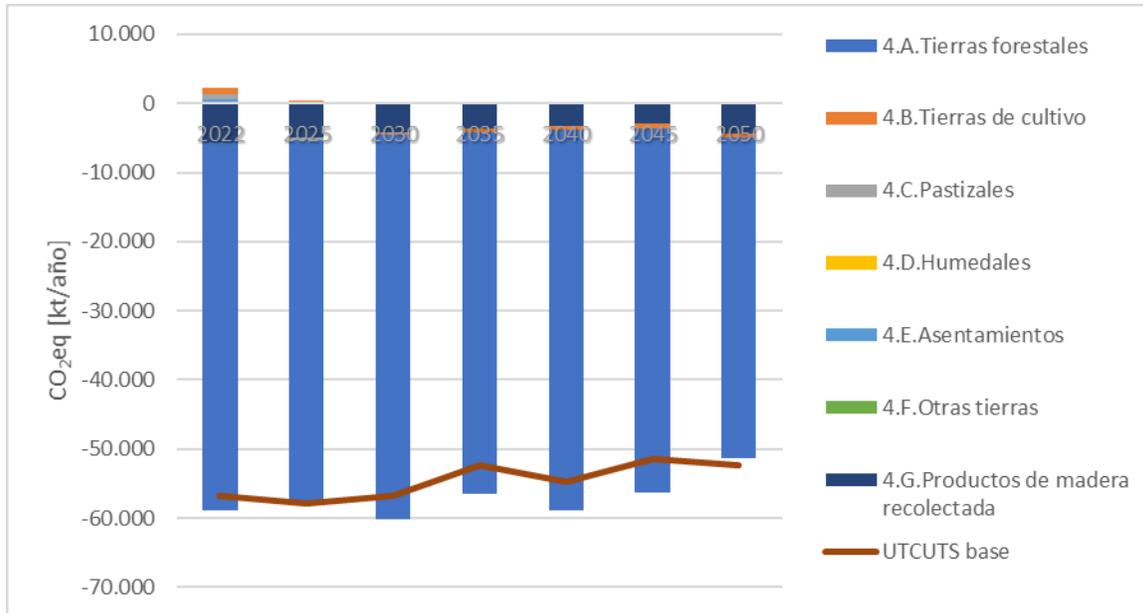


Gráfico 11. Emisiones de GEI escenario con medidas del sector UTCUTS



Las emisiones del sector Residuos se componen principalmente de emisiones de GEI como resultado de procesos microbiológicos que ocurren en la materia orgánica bajo degradación anaeróbica de residuos sólidos; descomposición anaeróbica de excretas humanas y el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas e industriales. Debido a esto, las emisiones de este sector son mayoritariamente metano ( $\text{CH}_4$ ).

De acuerdo con el INGEI, en el año 2022 el sector representó un 5,3% del balance de GEI y un 8,0% de las emisiones nacionales, alcanzando las 8.899 ktCO<sub>2</sub>eq, siendo las categorías Disposición de residuos sólidos (5.A) y Tratamiento y descarga de aguas residuales (5.D) las principales fuentes, con un 79% y 19% del total de emisiones del sector respectivamente; por último, las categorías Tratamiento biológico de residuos sólidos (5.B) e Incineración y quema abierta de residuos (5.C) representan sólo el 0,5% y 1,5% de las emisiones totales del sector.

## Sistema Nacional de Prospectiva

Los principales GEI emitidos por el sector en el 2022 son metano (CH<sub>4</sub>) con una participación del 85,9%, seguido por óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) con un 13,4% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) con un 0,7% del total de emisiones del sector.

### 2.6.1 Proyección de datos de actividad del sector Residuos

A diferencia del sector Agricultura, en el cual se proyectaron los datos de actividad de acuerdo con la tendencia de años anteriores, para poder realizar la proyección de residuos sólidos domiciliarios (RSD) y residuos industriales, era necesario en primer lugar, estimar el PIB PPA per cápita entre el 2023 y 2050, para luego correlacionarlos con los datos del informe “What a Waste 2.0”, en el cual existen datos de composición de los RSD y PIB PPA per cápita.

Y, para estimar el PIB PPA per cápita se ocuparon los datos de proyecciones de población del INE 2017, se recopilaron los datos de PIB PPA hasta el 2018 y datos proyectados de variación porcentual media del PIB desde el 2013 al 2050 desde el Ministerio de Hacienda.

Luego, para poder determinar la composición de lo RSD, se comparó el PIB PPA per cápita de Chile en el 2040 y 2050, y la tasa de urbanización de Chile en el 2040 y 2050, con los datos de PIB PPA per cápita y tasas de urbanización de la base de datos del informe What a Waste 2.0; restringiendo una diferencia porcentual de  $\pm 10\%$  de ambas variables, para de esta forma obtener la composición de los RSD de países con un PIB PPA per cápita similar al de Chile en los años 2040 y 2050.

Otras variables como, los lodos; y la incineración y quema de abierta de residuos se proyectaron de acuerdo con la proyección de crecimiento de la población y la tendencia de crecimiento de la variable en años previos.

Entre 2022 y 2050, se proyecta un aumento significativo en la generación de residuos sólidos domiciliarios, pasando de 8.113 kton a 11.250 kton, impulsado principalmente por el crecimiento urbano y económico. De manera similar, los residuos industriales se incrementan de 1.220 kton a 2.115 kton, reforzando la presión sobre los sistemas de gestión de residuos.

En contraste, la generación de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales se mantiene relativamente estable, mientras que los residuos de quema abierta, hospitalarios y de cremaciones muestran incrementos leves y constantes. Estas tendencias reflejan que la gestión de residuos seguirá siendo un desafío clave para la mitigación de emisiones en el futuro.

## Sistema Nacional de Prospectiva

Tabla S: Datos de actividad base del sector Residuos

Dato de actividad	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Generación de residuos sólidos domiciliarios (kton)	8.113	8.495M	9.174	9.799	10.360	10.840	11.250
Generación de lodos (m3)	788.200	770.400	790.500	805.800	816.200	822.200	824.500
Generación de residuos industriales (kton)	1.220	1.685	1.808	1.911	2.000	2.071	2.115
Residuos quema abierta (kton)	283	289	297	303	306	309	310
Cremaación (ton)	420	428	439	448	454	457	458
Residuos hospitalarios (ton)	670	683	700	714	723	729	731

### 2.6.2 Proyección Residuos escenario base

En el sector residuos, la categoría dominante es disposición de residuos sólidos (5.A), que muestra una trayectoria ascendente a lo largo de todo el período analizado. Esta tendencia se explica principalmente por el crecimiento proyectado en la generación de residuos domiciliarios (de 8.113 kton en 2022 a más de 11.200 kton en 2050) y residuos industriales, impulsados por el aumento de la actividad económica y la urbanización. Existe una relación positiva entre el crecimiento del PIB per cápita y la generación de residuos, fenómeno ampliamente documentado a nivel internacional (cita: Banco Mundial, What a Waste 2.0).

Además, según la metodología del IPCC 2006, las emisiones de metano de los residuos sólidos no dependen únicamente de los residuos dispuestos en un año específico, sino también de la acumulación histórica de residuos orgánicos en los vertederos, que se degradan lentamente durante varias décadas. Esto implica que el aumento sostenido en la generación de residuos tiene un efecto acumulativo en las emisiones proyectadas, intensificando la tendencia ascendente observada en el gráfico.

Por otro lado, el tratamiento y descarga de aguas residuales (5.D) mantiene una contribución constante y significativa, generando entre 1.500 y 1.800 ktCO<sub>2</sub>eq/año, asociada al manejo de lodos y aguas residuales, cuya generación muestra un crecimiento moderado a lo largo del período.

En contraste, las emisiones provenientes de las categorías tratamiento biológico (5.B) e incineración o quema abierta de residuos (5.C) son casi imperceptibles en el gráfico, lo que refleja su baja participación en el total de emisiones del sector en el escenario base.

## Sistema Nacional de Prospectiva

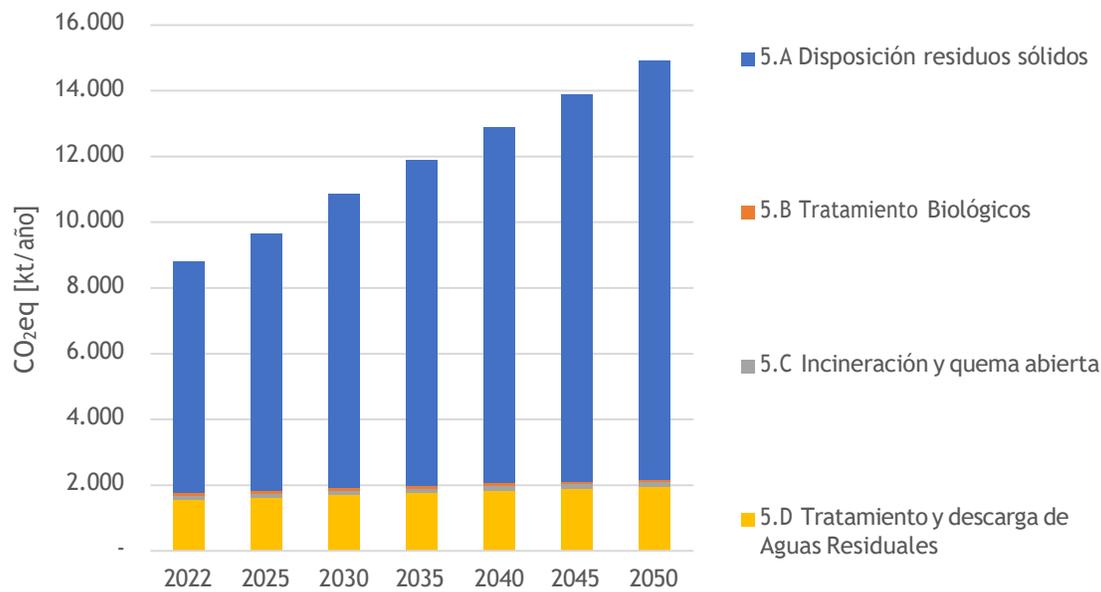


Gráfico 12. Emisiones de GEI escenario base del sector Residuos

### 2.6.3 Proyección Residuos escenario con medidas

Para las proyecciones del escenario con medidas, se simula un conjunto de medidas o acciones de mitigación a contar del año 2025, esto implica un efecto sobre los niveles de actividad, parámetros u otros determinantes de las emisiones de cada categoría del sector.

Tabla 10. Medidas de mitigación del sector Residuos

Medida	2030	2035	2040	2050
<b>1. Compostaje a gran escala</b>				
Capacidad instalada de compostaje (kton)	1.394	1.825		2.143
Se tratarán el 30% del volumen de residuos sólidos orgánicos municipales al 2030 mediante compostaje a gran escala al 2030 y un 66% de volumen de residuos al 2040. Esto mediante la instalación y operación de plantas de compostaje de 10 kton/año, 36 kton/año y 100 kton/año.				
<b>2. Compostaje domiciliario</b>				
Cantidad de compostaje domiciliario (kton)	113			113
Se tratarán 113 kton de residuos de residuos orgánicos mediante compostaje domiciliario en el 2030, evitando que lleguen a rellenos sanitarios. Esto implica la entrega y mantención de 500.000 composteras desde el año 2030.				
<b>3. Captura de metano rellenos sanitarios existentes y nuevos</b>				
	100%			100%
A partir del 2031 se captura el metano de rellenos sanitarios tradicionales (no manuales) para que el 100% de los rellenos tengan sistema de captura				
<b>4. Reciclaje de papel y cartón</b>				
	70%	70%	70%	70%

## Sistema Nacional de Prospectiva

Medida	2030	2035	2040	2050
Se alcanzará un 70% de reciclaje de papel y cartón al 2035, y se mantendrá el porcentaje hasta el 2050.				
<b>5. Reducción de Perdida y desperdicio de alimentos (PDA)</b>				
Residuos sólidos domiciliarios evitados (kton)	546			546
Se reducirá el desperdicio de alimentos evitando que sean dispuestos en rellenos sanitarios y contribuyendo a la seguridad alimentaria, por un total de 300 kton (equivalente a reducir un 50% el desperdicio) de alimentos al 2030 y se mantendrá constante en el tiempo.				
<b>6. Biodigestor industrial</b>	Instalación de 3 planta de digestión anaeróbica.	Instalación de 2 planta de digestión anaeróbica.	Instalación de 1 plantas de digestión anaeróbica.	Luego del 2040 no se incluyeron nuevos biodigestores a la modelación.
Se tratará el 30% de los residuos orgánicos industriales al 2030 y el 66% al 2040, evitando que lleguen a rellenos sanitarios. Este tratamiento ocurrirá en biodigestores industriales con una capacidad de 36,5 kton				

Como se observa el Gráfico 13, la categoría disposición de residuos sólidos (5.A) continúa siendo la principal fuente de emisiones del sector, aunque con una reducción significativa en comparación con el escenario base que comienza antes de 2030. Este descenso se relaciona principalmente con el cambio en la gestión de la fracción orgánica de los residuos.

A partir de 2030 se observan mejoras vinculadas al tratamiento fuera del relleno sanitario, a través de tecnologías que permiten desviar una parte importante de los residuos orgánicos, como el compostaje a gran escala y el compostaje domiciliario. Estas prácticas permiten tratar una proporción creciente del total de residuos orgánicos, reduciendo así la cantidad que termina degradándose anaeróbicamente y generando metano en rellenos sanitarios.

La reducción en las emisiones de la categoría 5.A también se ve intensificada a partir de 2031, cuando se proyecta que todos los rellenos sanitarios tradicionales cuenten con sistemas de captura de metano, lo que explica la estabilización y posterior descenso más marcado en esta categoría.

En paralelo, la categoría 5.D Tratamiento y descarga de aguas residuales mantiene una trayectoria prácticamente constante, sin grandes variaciones, aunque se espera una mejora en el uso de lodos tratados con fines de recuperación de suelos a partir de 2040, lo cual se refleja en una leve contención del crecimiento de emisiones.

## Sistema Nacional de Prospectiva

Las categorías tratamiento biológico (5.B) e incineración y quema abierta (5.C) muestran incrementos leves en su participación relativa, debido a la incorporación de tecnologías como biodigestores industriales en el tratamiento de residuos orgánicos industriales. Estos sistemas permiten capturar y aprovechar biogás, contribuyendo a reducir las emisiones netas del sector.

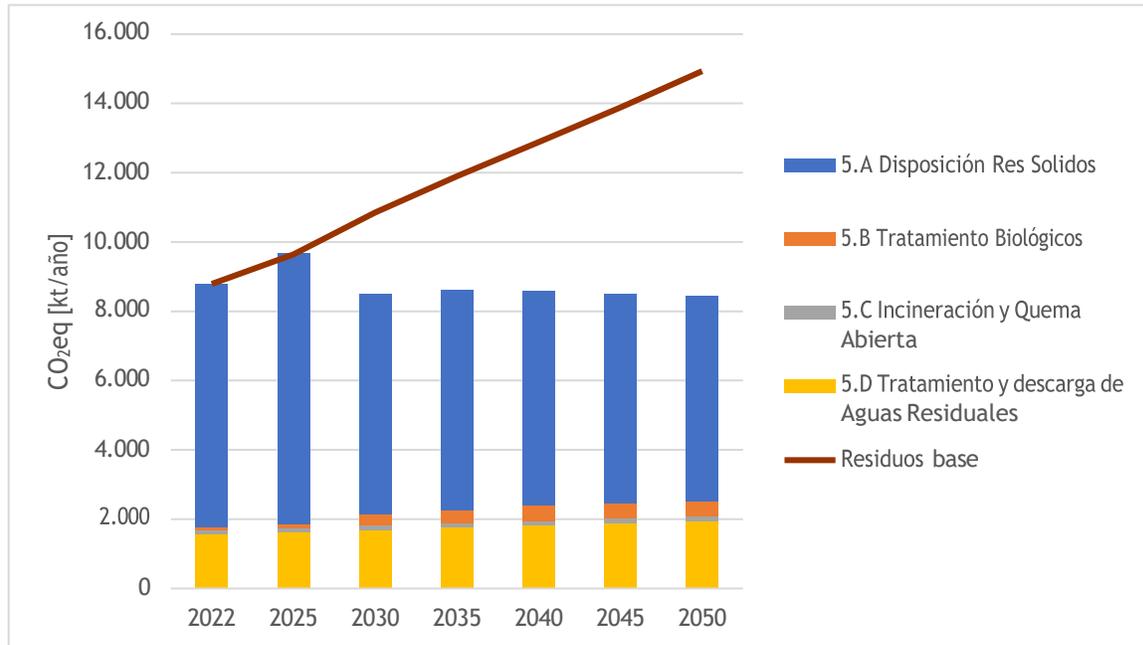


Gráfico 13. Emisiones de GEI escenario con medidas del sector Residuos

### 3. Resumen de proyecciones

Finalmente, en el Gráfico 14. Emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de todos los sectores, período 2020-2030. Gráfico 14 se presenta una proyección consolidada para el periodo 2020-2030 que integra las tendencias identificadas a nivel sectorial. Las proyecciones se estructuran en tres escenarios: el escenario base, que refleja la continuidad de las tendencias actuales sin intervenciones adicionales; el escenario PSM, que incorpora las políticas y medidas de mitigación de los Planes Sectoriales de Mitigación; y el escenario PSM con esfuerzo adicional, que asume intervenciones más ambiciosas para reducir emisiones.

El análisis sectorial evidenció que los sectores de mayor contribución son el Transporte (1.A.3), las Industrias manufactureras y de la construcción (1.A.2) con un crecimiento sostenido hasta aproximadamente el 2028, y las Industrias de la energía (1.A.4) que tienen una disminución en la tendencia de emisiones desde el 2025. Por

## Sistema Nacional de Prospectiva

otra parte, si se analizan los sectores no energéticos, el sector agricultura es el mayor aportante de GEI en el periodo 2020-2030.

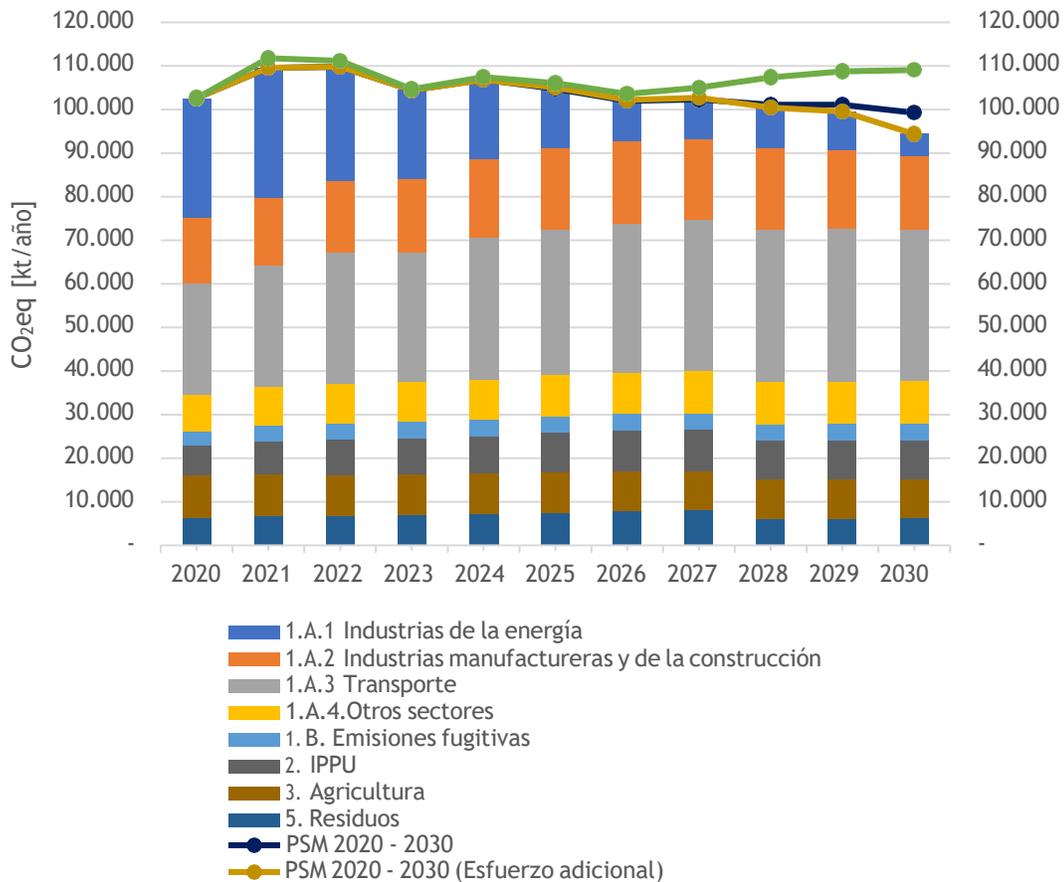


Gráfico 14. Emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de todos los sectores, periodo 2020-2030.

En el Gráfico 15, se muestra el resultado de las proyecciones de todos los sectores agregados hasta el 2050 (excluyendo UTCUTS). En este caso, si bien es una extensión del gráfico anterior, se observan cambios más drásticos en la disminución de emisiones, en donde se destaca la descarbonización de la matriz energética al 100% en el sector 1.A.1 Industrias de la energía; también se destaca la disminución de emisiones del sector Transporte 1.A.3 e IPPU en los sectores no energéticos.

## Sistema Nacional de Proyectiva

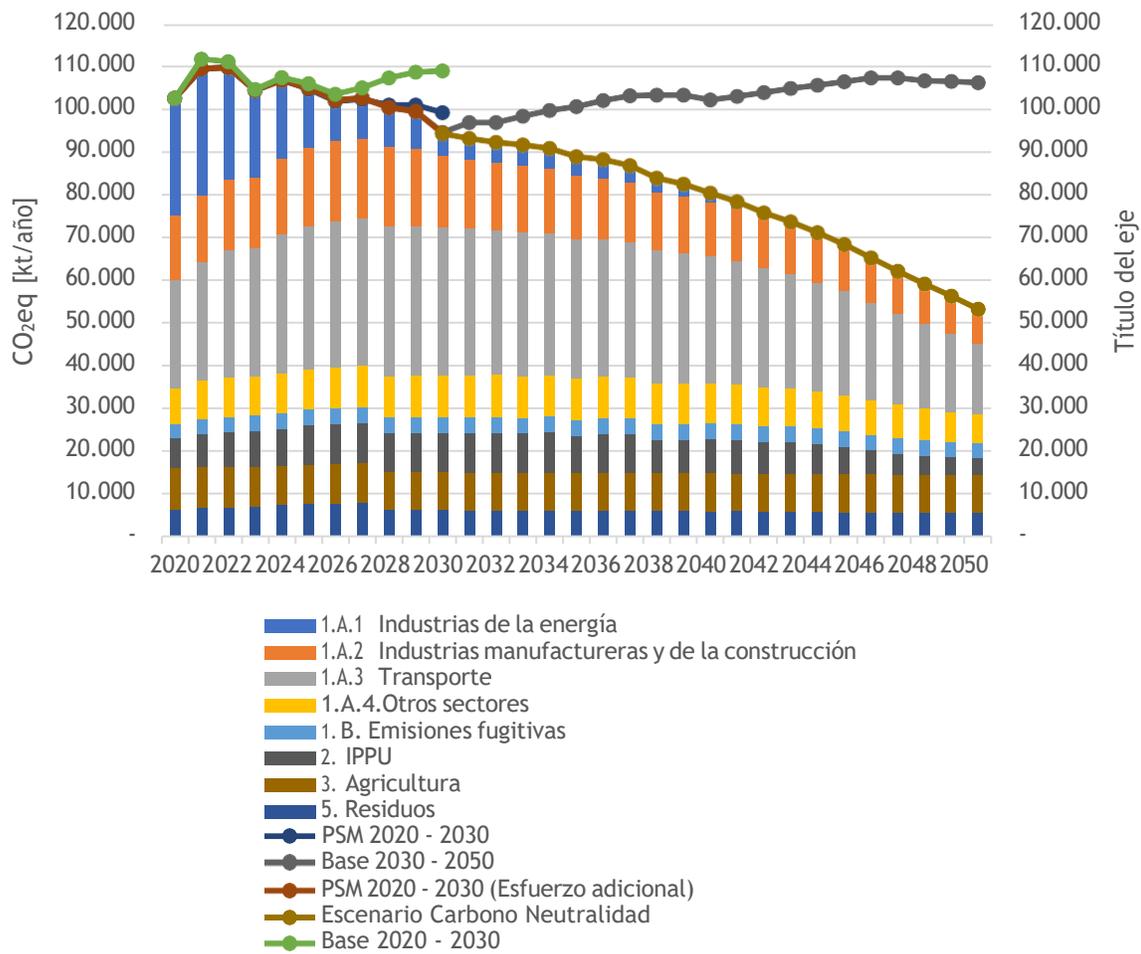


Gráfico 15. Emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub>eq de todos los sectores, periodo 2020-2030.

## 4. Reducciones por medidas

Como se observa en la tabla durante el periodo 2020-2035, destacan medidas con alto impacto temprano como la captura de metano en rellenos sanitarios existentes (6.193 ktCO<sub>2</sub>e), forestación (7.723 ktCO<sub>2</sub>e) y el uso eficiente de fertilizantes (824 ktCO<sub>2</sub>e). En contraste, algunas acciones muestran emisiones netas como la prohibición de HFC de alto PCG (-1 ktCO<sub>2</sub>e) y el compostaje domiciliario (-4 ktCO<sub>2</sub>e), posiblemente debido a efectos transitorios de implementación o desplazamiento de emisiones.

En el periodo 2030-2040, se intensifica la absorción y mitigación. Sobresale la forestación con más de 34.500 ktCO<sub>2</sub>e, seguida por el compostaje a gran escala (5.083 ktCO<sub>2</sub>e), y el uso eficiente de fertilizantes (3.494 ktCO<sub>2</sub>e). Las tecnologías de captura de metano, el reciclaje de papel y cartón, y los planes de manejo del bosque nativo también muestran un fuerte crecimiento en su impacto.

## Sistema Nacional de Prospectiva

Entre 2040-2050, se consolida el efecto de largo plazo de varias medidas estructurales: la forestación alcanza su máximo acumulado (37.850 ktCO<sub>2</sub>e), seguido por el reciclaje de papel y cartón (16.512 ktCO<sub>2</sub>e), y nuevamente el compostaje a gran escala (11.153 ktCO<sub>2</sub>e). Aumentan también las absorciones por lodos, reducción de pérdidas y desperdicios de alimentos, y captura en nuevos rellenos

Tabla 11. Mitigación alcanzada por cada medida no energética

Sector	Medida	2020-2035 [ktCO <sub>2</sub> eq]	2020-2050 [ktCO <sub>2</sub> eq]
IPPU	Norma de Emisión HFC	4.019	475
	Plantas regeneración HFC	314	10.478
	Prohibición HFC alto PCG	24	1.156
	Prohibición instalación SF6	207	873
	Reducción factor clinker cemento	531	2.113
Total IPPU		5.095	15.095
Agricultura	Biodigestores purines porcinos	46	215
	Uso eficiente de fertilizante	745	8.873
	Biodigestores purines bovinos	72	487
	Mejoramiento dieta bovina	80	464
	Reducción quemas agrícolas	167	618
	Arroz bajo en metano	71	480
Total Agricultura		1181	11.137
UTCUTS	Planes de manejo	2.800	11800
	Forestación	28.300	77.100
Total UTCUTS		31.100	88.900
Residuos	Captura de rellenos sanitarios	16.795	47.263
	Captura en nuevos rellenos sanitarios	9.525	187
	Compostaje a gran escala	1652	16.230
	Biodigestor industrial	283	1.929
	Reciclaje de papel cartón	1414	21.405
	Compostaje domiciliario	109	1.147
	Reducción de pérdida y desperdicio de alimentos	733	4.336
Total Residuos		30.511	33.434

## Sistema Nacional de Prospectiva

Como se observa en la tabla, durante el periodo 2020-2035 destacan medidas del sector transporte, especialmente la electromovilidad liviana (26.317 ktCO<sub>2e</sub>), que se consolida como la principal acción de mitigación temprana. También sobresalen la descarbonización de la matriz eléctrica (21.600 ktCO<sub>2e</sub>), la electrificación motriz en la industria (5.767 ktCO<sub>2e</sub>) y en la minería (4.365 ktCO<sub>2e</sub>), así como el uso de CAEX sustentables (4.114 ktCO<sub>2e</sub>). En el ámbito residencial, la electrificación de la calefacción (3.445 ktCO<sub>2e</sub>) y la generación distribuida (2.623 ktCO<sub>2e</sub>) muestran aportes relevantes. A partir de 2035, se intensifica el impacto de las medidas estructurales, en particular en transporte, donde la electromovilidad, tanto liviana como pesada, concentra el mayor volumen de mitigación acumulando más de 270.000 ktCO<sub>2e</sub> al 2050, seguida por avances sostenidos en electrificación industrial y minera, penetración del hidrógeno verde, y sustitución de combustibles fósiles en calefacción y cocción residencial. En conjunto, el sector energía alcanza una mitigación de casi 579 MtCO<sub>2e</sub> al 2050, liderando el esfuerzo de reducción de emisiones en el país.

Tabla 12. Mitigación alcanzada por cada medida del sector energía

Sector	Medida	2020-2035 [ktCO <sub>2e</sub> ]	2020-2050 [ktCO <sub>2e</sub> ]
Minería	CAEX sustentable	4.114	46.115
Otros Energía	Calefacción Elec. Comercial	795	5.910
	Elec. Motriz Comercial	1.232	7.629
Industria	Elec. Térmica Industria	2.052	9.194
	SST Industrias	4.586	13.820
	H2V Térmico Industria	1.252	6.508
	Elec. Motriz Industria	5.767	28.535
	H2V Motriz Industria	107	5.180
Minería	Elec. Térmica Minería	343	1.656
	SST Minería	309	946
	H2V Térmico Minería	81	417
	Elec. Motriz Minería	4.365	19.289
	H2V Motriz Minería	41	3.805
Residencial	SST residencial	270	1.116
	Calefacción Elec.	3.445	24.768
	Cocción Elec.	279	4.116
	ACS elec.	102	6.373
	Energía Distrital	33	353
	Reglamentación Térmica	679	3.814
	Acondicionamiento Térmico	318	1.867
	Generación Distribuida	2.623	3.599
Transporte	Electromov. Livianos	26.317	152.695

## Sistema Nacional de Prospectiva

	Electromov. Medianos	6.499	80.364
	Electromov. Taxis	5.033	24.445
	Electromov. Red	5.948	15.578
	Electromov. RM no RED	407	2.303
	Electromov. Buses regiones	673	7.402
	Electromov. Camiones	6.317	31.542
	Tractocamiones sustentables	477	31.853
Generación	Descarbonización	21.600	37.700
	Total Energía	106.065	578.892

### 5. Costos por medidas

A continuación, se presentan los resultados de los costos de implementación de cada una de las medidas de mitigación para los sectores no energéticos. Cabe destacar que, estos son resultados parciales y podrían sufrir modificaciones en el futuro a medida que se ajusten los modelos.

Para realizar la estimación de costos de inversión (CAPEX) y costos de operación (OPEX) se recopiló información de costos unitarios por medida –como el valor de equipos, maquinaria, mano de obra, entre otros–, utilizando datos representativos para Chile. A partir de esta información se calcularon los costos acumulados para el período de la nueva NDC 2025 y la meta de carbono neutralidad al 2050. Adicionalmente, en algunos casos se consideraron ciertos beneficios económicos asociados a las medidas, tales como ahorros en servicios de aseo y ornato o reducciones en el consumo de refrigerantes, que se incorporaron como disminuciones en los costos de operación (OPEX). Esta consideración permite reflejar de manera más realista los impactos económicos netos de la implementación de las medidas. Por el momento no se están considerando algunos beneficios más complejos de estimar, como por ejemplo reducción de mortalidad por contaminación, disminución de episodios respiratorios o disminución de efectos sociales.

Tabla 13. Costos de inversión y operación por medida no energéticas

Sector	Medida	2020 - 2035		2020 - 2050	
		Capex [MM USD]	Opex [MM USD]	Capex [MM USD]	Opex [MM USD]
IPPU	Norma de emisión HFC	12,0	1,1	24,5	9,2
	Prohibición HFC alto PCG	1,1	-0,5	32,3	-2,3
	Prohibición instalación SF6	24,9	-1,3	61,3	-4,2
	Reducción factor clinker cemento	26,2	-39,4	49,6	-77,4

## Sistema Nacional de Prospectiva

Sector	Medida	2020 - 2035		2020 - 2050	
		Capex [MM USD]	Opex [MM USD]	Capex [MM USD]	Opex [MM USD]
Total IPPU		64,3	-40,1	167,7	-74,6
Agricultura	Biodigestores purines porcinos	37,8	-4,1	59,3	-11,8
	Uso eficiente de fertilizante	0,0	53,9	0,0	111,2
	Biodigestores purines bovinos	7,5	-1,2	11,8	-2,7
	Mejoramiento dieta bovina	0,0	12,7	0,0	31,8
	Reducción quemas agrícolas	0,0	-12,6	0,0	-36,6
	Arroz bajo en metano	0,0	-7,2	0,0	-19,0
Total Agricultura		45,3	41,6	71,1	72,9
UTCUTS	Planes de manejo	0,0	753	0	1.986
	Forestación	257,9	0	613	0
Total UTCUTS		257,9	753	613	1.986
Residuos	Captura rellenos sanitarios	229	339	479	698
	Captura en nuevos rellenos sanitarios				
	Compostaje a gran escala	22	738	109	1.717
	Biodigestor industrial	6	22	27	53
	Reciclaje de papel cartón	3	-1.057	13	-6.087
	Compostaje domiciliario	34	-29	111	-62
	Reducción de perdida y desperdicio de alimentos	7	815	31	1.650
Total Residuos		300	804	771	-2.029

En términos de inversión inicial (CapEX), las medidas con mayores requerimientos al 2025 son la forestación (258 millones USD), la captura de metano en rellenos sanitarios (229 millones USD) y los planes de manejo forestal (sin CapEx asociado, pero con costos operacionales altos). Para el escenario al 2050, la forestación casi se duplica en inversión con 613 millones USD, mientras que la captura en rellenos asciende a 479 millones.

Respecto a los costos de operación (OpEX), se identifican valores particularmente altos en medidas como planes de manejo forestal (753 millones al 2025 y 1.986 millones al 2050), gran compostaje (738 millones al 2025) y reducción de pérdidas y desperdicio de alimentos (815 millones al 2025 y 1.650 millones al 2050). Por el contrario, varias medidas presentan costos negativos de operación, es decir, generan ahorros, como el compostaje domiciliario (-29 millones al 2025), la reducción de quemas agrícolas (-12,6 millones al 2025 y -36,6 millones al 2050) y el reciclaje de

## Sistema Nacional de Prospectiva

papel y cartón, con ahorros aún mayores (-1.057 millones al 2025 y -6.087 millones al 2050).

Tabla 14. Costos de inversión, operación y externalidades por medida del sector energía.

Sector	Medida	2020 - 2035			2020 - 2050		
		Capex [MM USD]	Opex [MM USD]	Extern [MM USD]	Capex [MM USD]	Opex [MM USD]	Extern [MM USD]
Minería	CAEX sustentable	106	-507	8	958	-3.544	51
Otros Energía	Calefacción Elec. Comercial	182	-273	17	819	-1.243	67
	Elec. Motriz Comercial	11	-258	142	41	-989	563
Industria	Elec. Térmica Industria	200	776	162	578	3.113	295
	SST Industrias	260	-1.745	55	755	-3.842	122
	H2V Térmico Industria	24	552	225	102	1.901	186
	Elec. Motriz Industria	23	-803	524	72	-2.570	981
	H2V Motriz Industria	0	3	187	12	1	248
Minería	Elec. Térmica Minería	2	22	-0	4	65	-0
	SST Minería	1	-9	-	4	-22	-
	H2V Térmico Minería	0	4	-0	1	16	14
	Elec. Motriz Minería	3	-151	68	10	-450	108
	H2V Motriz Minería	0	0	-	1	-13	-
Residencial	SST residencial	69	-124	3	206	-409	6
	Calefacción Elec.	878	-512	7.437	5.000	-2.861	31.427
	Cocción Elec.	6	-39	7	46	-511	77
	ACS elec.	6	-5	2	101	-97	36
	Energía Distrital	65	-8	170	446	-172	1.184
	Reglamentación Térmica	1.987	-468	1.192	7.122	-1.491	1.975
	Acondicionamiento Térmico	945	-178	570	3.317	-752	1.485
	Generación Distribuida	3.570	-4.670	-	6.026	-7.718	SI
Transporte	Electromov. Livianos	7.591	-7.717	156	19.542	-27.560	380
	Electromov. Medianos	2.527	-2.226	92	9.312	-9.365	1.708
	Electromov. Taxis	457	-1.229	10	1.104	-3.978	29
	Electromov. Red	636	-1.599	961	1.119	-3.019	1.297
	Electromov. RM no RED	80	-105	74	336	-332	226
	Electromov. Buses regiones	304	-154	45	2.085	-437	285
	Electromov. Camiones	961	-1.123	657	3.461	-829	8.987
	Tractocamiones sustentables	0	139	6	1.073	1.148	655
Generación	Descarbonización	1.532	-89	300	14.412	-6.363	297
Total Energía		22.428	-22.496	13.070	78.065	-72.324	52.689



## Sistema Nacional de Prospectiva

Como se observa en la tabla, el sector energía no solo presenta medidas con alto potencial de mitigación, sino también con efectos económicos y sociales significativos. Al 2035, destacan inversiones relevantes en descarbonización de la generación (1.532 millones USD), electromovilidad liviana (7.591 millones USD) y generación distribuida (3.570 millones USD). Estas cifras aumentan considerablemente hacia 2050, alcanzando más de 78.000 millones USD en inversión acumulada. Sin embargo, muchas de estas medidas presentan costos de operación negativos, es decir, generan ahorros durante su implementación, como ocurre por ejemplo en electromovilidad, SST, calefacción eléctrica y generación distribuida. A ello se suma una nueva dimensión de análisis: las externalidades positivas en salud y bienestar social, como la reducción de mortalidad asociada a contaminación atmosférica, la disminución de enfermedades respiratorias y los beneficios derivados de mejorar la calidad del aire en zonas urbanas. Estas externalidades, cuantificadas en más de 52.000 millones USD al 2050, son especialmente relevantes en el ámbito de la calefacción residencial, desde el acondicionamiento de las viviendas hasta las tecnologías de calefacción, lo que refuerza el valor integral de estas acciones más allá de su impacto climático.

### 5.1 Costo efectividad por medida

Por último, se estimó el costo efectividad por medida durante el periodo 2020 - 2050, tanto con medidas del sector energía como para el resto de los sectores. Se destacan algunas oportunidades relevantes que generan ahorros económicos netos combinados con alto impacto en mitigación, particularmente en medidas no energéticas, como el reciclaje de papel y cartón (Costo de abatimiento muy negativo de -284 US\$/tCO<sub>2</sub>eq) con significativa mitigación acumulada (21,4 MtCO<sub>2</sub>eq al 2050). Sin embargo, otras medidas atractivas económicamente por su MAC negativo, tales como la reducción de quemas agrícolas (-59 US\$/tCO<sub>2</sub>eq) y la reducción del uso de clinker en cemento (-13 US\$/tCO<sub>2</sub>eq), ofrecen volúmenes bajos de mitigación acumulada, limitando su potencial global pese a su aparente atractivo financiero.

Asimismo, existen medidas con altos costos de operación (OpEX) y sin inversiones iniciales (CapEX=0), destacando críticamente los planes de manejo y la reducción de pérdidas y desperdicios (PCD), con costos de abatimiento extremadamente elevados (168 y 388 US\$/tCO<sub>2</sub>eq respectivamente), que implican gastos operacionales sostenidos considerables. Esto sugiere que, aunque estas medidas puedan contribuir



## Sistema Nacional de Prospectiva

significativamente a la mitigación acumulada total, requieren cuidadosa evaluación debido al importante esfuerzo económico continuo que implican.

Por otro lado, algunas medidas demandan inversiones iniciales altas (CapEX), aunque sus costos operacionales son limitados o nulos. Tal es el caso de forestación (613 MUS\$) y captura de rellenos sanitarios (479 MUS\$), que aunque presentan MAC moderados y aportan reducciones acumuladas importantes, requieren una evaluación estratégica respecto a las fuentes específicas de financiamiento disponibles.

En contraste, medidas como los biodigestores porcinos, con costos de abatimiento altos (221 US\$/tCO<sub>2</sub>eq) y bajas mitigaciones acumuladas, cuestionan su prioridad frente a otras medidas que ofrecen mayor costo-efectividad relativa. Alternativamente, los biodigestores industriales, aunque poseen costos elevados, proporcionan mayor eficiencia en términos de mitigación por inversión realizada.

# Sistema Nacional de Prospectiva

Curva MACC - Medidas Energía y No Energía (2020-2050)

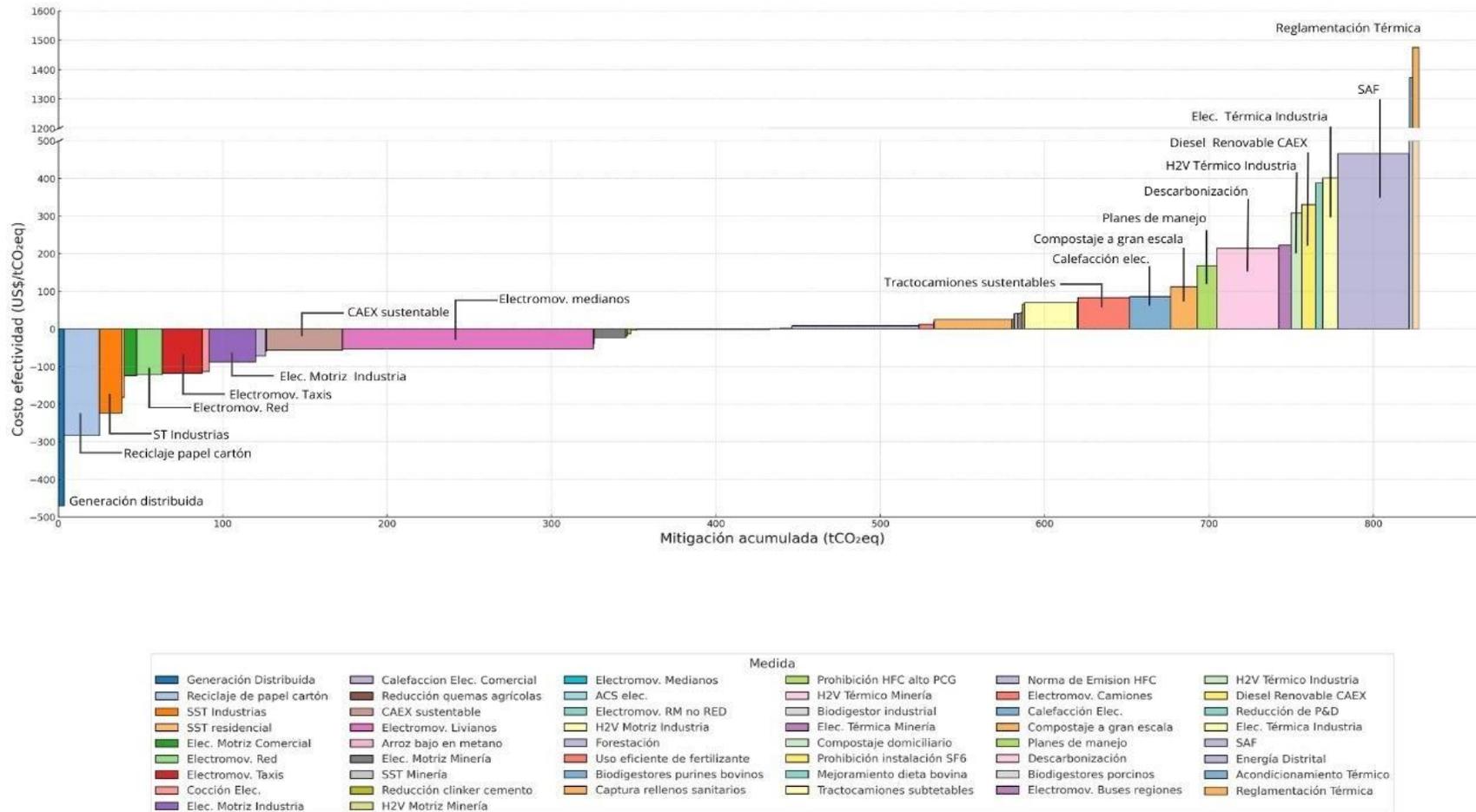


Gráfico 16. Curva MACC medidas durante el período 2020 - 2050.



## 6. Compromiso de reducción de carbono negro

Para el compromiso de reducción de emisiones de carbono negro (BC, por su sigla en inglés) se consideraron los antecedentes recopilados por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 en su estudio “Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile”<sup>5</sup>. Este estudio considera trayectorias de consumos energéticos con miras hacia la Carbono Neutralidad, las que fueron traducidas a emisiones de carbono negro.

Los resultados muestran una disminución sustantiva de las emisiones de carbono negro al considerar medidas de mitigación de gases de efecto invernadero (Gráfico 17). Sin embargo, las reducciones de carbono negro producidas por solo las acciones de mitigación de gases de efecto invernadero, no tienen el mayor potencial de mitigación de carbono negro. Considerando esto, se propuso un escenario con medidas adicionales que consideran la implementación de sistemas de calefacción menos contaminantes y la aplicación de normativas a las maquinarias fuera de ruta. El escenario Carbono Neutralidad + (línea punteada verde en Gráfico 17) muestra la trayectoria de las emisiones de carbono negro considerando las medidas consideradas para la reducción de gases de efecto invernadero y las medidas adicionales para la reducción de carbono negro.

Considerando que las medidas propuestas y a su vez los escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero poseen una gran incertidumbre, la contribución en materia de carbono negro es definida por un mínimo de reducción que se encuentra entre los escenarios Carbono Neutralidad y Carbono Neutralidad +.

---

<sup>5</sup> <https://www.cr2.cl/carbononegro/>

## Sistema Nacional de Prospectiva

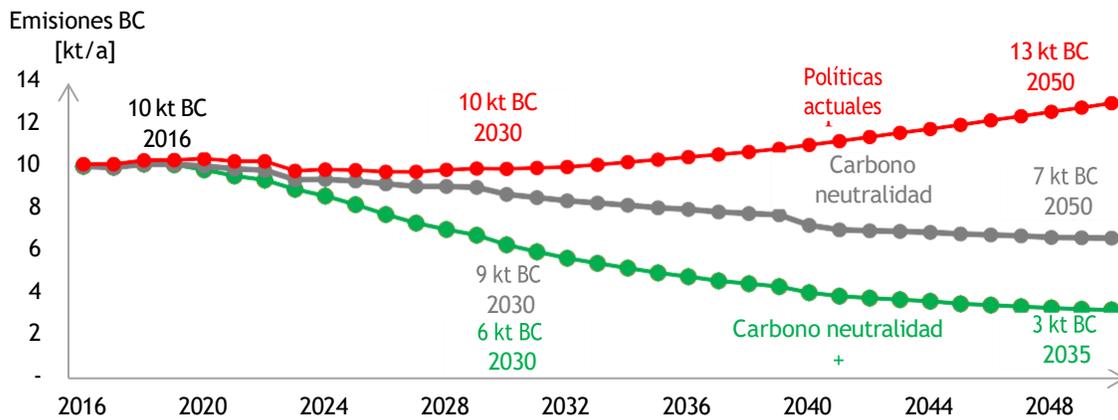


Gráfico 17. Emisiones de carbono negro (kt) para diferentes escenarios de mitigación con miras hacia la Carbono Neutralidad.

## 7. Conclusiones

El presente documento entrega un panorama de los escenarios de mitigación desarrollados en el marco de la actualización 2025 de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC). A partir de un proceso técnico riguroso, respaldado por herramientas de modelación sectorial y participación interinstitucional, se identificaron trayectorias factibles para reducir emisiones de gases de efecto invernadero en todos los sectores del inventario nacional.

En el sector energía, que representa más del 76% de las emisiones del país, las principales oportunidades de mitigación de corto y mediano plazo se concentran en la descarbonización de la matriz eléctrica y en la expansión de la electromovilidad. Estas medidas no solo tienen alto potencial de reducción, sino que también generan externalidades positivas significativas, como mejoras en la calidad del aire urbano y beneficios sociales y sanitarios.

En los sectores no energéticos, destacan acciones como la forestación, el manejo del bosque nativo, la captura de metano en rellenos sanitarios, y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles. Si bien estos sectores presentan menores volúmenes de mitigación en comparación al energético, su impacto es relevante desde una perspectiva territorial, de justicia climática y de cobeneficios socioambientales.

Los análisis de costos muestran que varias medidas poseen una alta costo-efectividad, y algunas incluso generan ahorros operacionales netos. Además, la incorporación del análisis de externalidades permite dimensionar los beneficios en salud pública y bienestar, fortaleciendo el argumento para su priorización.



## Sistema Nacional de Prospectiva

En conjunto, los escenarios presentados permiten trazar una ruta técnicamente robusta y socialmente beneficiosa hacia el cumplimiento de los presupuestos de emisiones y la meta de carbono neutralidad al 2050, en línea con lo establecido en la Ley Marco de Cambio Climático y los compromisos internacionales asumidos por el país.