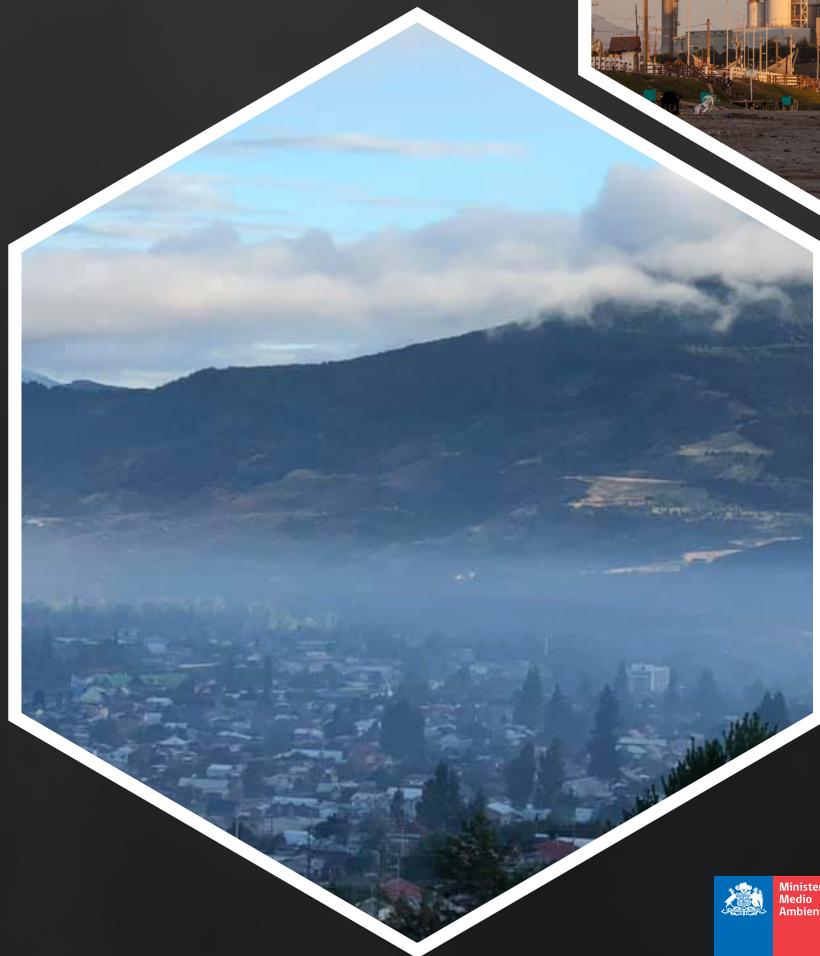


# Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

(CR)<sup>2</sup> | Center for Climate and Resilience Research

Resumen para tomadores de decisión



Santiago, enero de 2020



# Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

## PRESENTACIÓN

En el contexto del Acuerdo de París, Chile está revisando su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés). Bajo ese marco, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, [www.cr2.cl/](http://www.cr2.cl/)), de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, está apoyando a la Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en el diseño, evaluación y justificación –mediante la implementación de un enfoque metodológico– de una meta de reducción cuantificada de carbono negro (BC, por sus siglas en inglés), integrable y consistente con la meta de reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Para ejecutar este apoyo, se ha suscrito un acuerdo entre las partes a través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El mismo está en el marco de la implementación de iniciativas de acción y planificación nacional (*Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants, SNAP*) que promueve la Coalición de Aire Limpio y Clima (CCAC, [www.ccacoalition.org/](http://www.ccacoalition.org/)).

Aquí se presenta un resumen para tomadores de decisión, resaltando los aspectos metodológicos y los resultados más importantes del estudio. Este resumen se complementa con un informe extendido y anexos que detallan la información y relevan la interacción entre el grupo ejecutor y el mandante.

Citar como:

Gallardo, L., Basoa, K., Tolvett, S., Osses, M., Huneus, N., Bustos, S., Barraza, J., Ogaz, G. (editores) (2020), Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Resumen para tomadores de decisión. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia para el Ministerio del Medio Ambiente a través de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la iniciativa *Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants (SNAP)*, 32 pp. Disponible en: <http://www.cr2.cl/carbononegro/>



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### EQUIPOS RESPONSABLES

#### Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia

**Laura Gallardo** (Directora de Proyecto), Profesora Titular, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Investigadora Principal

**Sebastián Tolvett** (Director Alternativo de Proyecto), Académico Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Investigador Adjunto

**Kevin Basoa** (Investigador), Ingeniero de Proyecto, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Ingeniero

**Nicolás Huneeus** (Investigador), Profesor Asistente, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Investigador Asociado

**Mauricio Osses** (Investigador), Académico del Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Investigador Adjunto

**Susana Bustos**, Ingeniera civil industrial (Gestión de proyectos)

**José Barraza**, periodista (Divulgación)

**M. Giselle Ogaz**, diseñadora gráfica (Diseño)

El equipo cuenta con el apoyo científico de **Luisa T. Molina**, *Molina Center for Energy and the Environment* ([www.mce2.org/es](http://www.mce2.org/es)) en calidad de asesora externa.

#### Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente

**Jenny Mager**, encargada de Mitigación e Inventarios

**Bruno Campos**, profesional de Mitigación e Inventarios

**Richard Martínez**, profesional de Mitigación e Inventarios

**Carmen G. Contreras**, profesional de Mitigación e Inventarios



# Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Presentación .....	1
Equipos responsables.....	2
Índice de contenidos .....	3
Resumen ejecutivo .....	4
Executive summary .....	6
<b>I. ¿Por qué mitigar carbono negro? .....</b>	<b>7</b>
1. ¿Qué es el carbono negro? .....	8
2. El carbono negro impacta el clima y la salud.....	9
3. ¿De dónde viene el carbono negro? .....	12
<b>II. ¿Cómo se proyectaron los escenarios de mitigación de carbono negro? .....</b>	<b>18</b>
1. Herramienta de proyección de escenarios y evaluación de impactos.....	18
2. Escenarios y medidas de mitigación evaluadas para carbono negro.....	18
a. Escenario políticas actuales.....	19
b. Escenario carbono neutralidad.....	20
c. Escenario de carbono neutralidad + .....	20
<b>III. Proyección de las emisiones de carbono negro para Chile.....</b>	<b>22</b>
<b>IV. ¿Cómo hacer el seguimiento? .....</b>	<b>25</b>
<b>V. Recomendaciones y conclusiones .....</b>	<b>28</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>33</b>



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### RESUMEN EJECUTIVO

Las urbes son el escenario clave donde la acción climática y los cambios transformacionales deben ocurrir para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París, y así evitar los impactos adversos de un mundo insostenible y en rápido calentamiento. Esto implica lograr la carbono neutralidad global para el año 2050, así como la mitigación de los forzantes climáticos de vida media corta (SLCF, por sus siglas en inglés), metano ( $\text{CH}_4$ ) y carbono negro (BC) en particular. Esto, a su vez, enfatiza la necesidad de abordar la mitigación de SLCF de manera consistente con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros forzantes climáticos de vida media larga. Además, la evidencia sugiere que reducir los SLCF puede facilitar el logro de los ODS, principalmente a través de cambios en la matriz tecnológica y energética, y sus consecuencias en la calidad del aire.

Lo anterior se aplica al mundo en general, pero especialmente a Chile, donde la fracción de población urbana ha alcanzado casi el 90 % y los problemas de calidad del aire siguen siendo importantes a pesar de los esfuerzos de larga data. Esto fue reconocido por Chile en su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) en 2015. En el anteproyecto de actualización presentado el 2019 se establece el objetivo cuantitativo de una reducción de emisiones de carbono negro de entre 10 y 25 % para 2030 con respecto a 2016. En el presente estudio, las medidas de mitigación consideradas para los gases de efecto invernadero de larga duración (LLGG) se han evaluado en términos de su potencial para reducir el BC durante el período 2016-2050, utilizando el marco de análisis del *Long-Range Energy Alternatives Planning System - Integrated Benefits Calculator* (LEAP-IBC). Además de las opciones de mitigación para LLGG, se han evaluado medidas específicas de los planes de descontaminación del aire. El escenario de neutralidad de gases de efecto invernadero implica una reducción desde 10 kton/a de BC en 2016 a 8,7 kton/a en 2030, y a 6,6 kton/ en 2050. Las reducciones correspondientes a trazas coemitidas con el carbono negro también se muestran. Si bien la neutralidad de LLGG da como resultado reducciones significativas a nivel nacional de partículas, incluyendo BC y sus precursores, la misma no implica una mejora significativa en la calidad del aire o los efectos climáticos regionales relevantes. Esto se debe al tiempo de residencia muy diferente de LLGG y partículas, incluido el BC. Por eso se propuso un escenario transformacional, con medidas específicamente enfocadas a reducir el carbono negro en entornos urbanos, suponiendo la implementación de calefacción distrital y de estándares más estrictos para maquinaria fuera de ruta. Este escenario es funcional a enfrentar la pobreza energética y la desigualdad ambiental que prevalecen en el centro y sur de Chile.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

El carácter regional de los impactos del carbono negro y la necesidad de buscar opciones con beneficio tanto en el clima como en la calidad del aire, hacen necesario coordinar e integrar la gestión de ambos. En particular, es nuestra opinión experta, que se requiere desarrollar inventarios nacionales para partículas, incluyendo carbono negro y sus precursores gaseosos, en la mayor resolución espacial posible (ca. 1 km<sup>2</sup>) y extender el alcance de los planes de descontaminación atmosférica, complementándolos con monitoreo del carbono negro y especies asociadas, así como de dióxido de carbono urbano. Finalmente, el estudio esboza un sistema de monitoreo, reporte y verificación basado en iniciativas existentes, generalmente orientadas a la transición energética y la mitigación de gases de efecto invernadero.





## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### EXECUTIVE SUMMARY

Cities are the key scenario where climate action and transformational changes must occur to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Paris Agreement, avoiding the adverse impacts of an unsustainable and rapidly warming world. This implies achieving global carbon neutrality by 2050, as well as mitigating short-lived climate forcers (SLCF), methane (CH<sub>4</sub>) and black carbon (BC) in particular. This, in turn, emphasizes the need to address the mitigation of SLCF in a manner consistent with carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other long-lived climate forcers. In addition, the evidence suggests that reducing SLCF can facilitate the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs), mainly through technological and energy matrix changes and its consequences on air quality.

The above applies to the world in general, but especially to Chile, where urbanization has reached almost 90% and air quality problems remain an issue of concern despite long-standing efforts. This was recognized by Chile in its Nationally Determined Contribution in 2015. In the draft update version presented in 2019, a quantitative black carbon mitigation objective of between 10 and 25% with respect to 2016 by 2030 is established. In this work, mitigation measures considered for long-lived greenhouse gases (LLGG) have been evaluated in terms of their potential to reduce BC during the 2016-2050 period using the Long-Range Energy Alternatives Planning System analysis framework - Integrated Benefits Calculator (LEAP-IBC). In addition to the mitigation options for LLGG, specific measures of air pollution attainment plans have been evaluated. The LLGG neutrality scenario implies a reduction from 10 kton/year of BC in 2016 to 8.7 kton/year in 2030, and 6.6 kton/year in 2050. The corresponding reductions of tracers co-emitted with black carbon are also shown. While LLGG neutrality results in significant reductions at the national level of particles, including BC, and its precursors, it does not imply a significant improvement in air quality or the relevant regional climatic effects. This is due to the very different residence times of LLGG and particles, including BC. That is why a transformational scenario was proposed, with measures specifically focused on reducing black carbon in urban environments, assuming the implementation of district heating and stricter standards for off-road machinery. This scenario is functional in addressing the energy poverty and environmental inequality that prevails in central and southern Chile.

The regional nature of the impacts of black carbon and the need to look for options that benefit both climate and air quality, make it necessary to coordinate and integrate the management of both. In particular, in our expert opinion, it is necessary to develop national inventories for particles, including black carbon, and their gaseous precursors, in the greatest possible spatial resolution (~ 1 km<sup>2</sup>) and extend the scope of air pollution attainment plans, complementing them with monitoring of carbon black and associated species, as well as urban carbon dioxide. Finally, the study outlines a monitoring, reporting and verification system based on existing initiatives generally oriented towards energy transition and the mitigation of greenhouse gases.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### I. ¿POR QUÉ MITIGAR CARBONO NEGRO?

El informe sobre 1,5 °C del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) indica que para alcanzar la meta de no sobrepasar un calentamiento de 1,5 °C por sobre la época preindustrial hacia el año 2100, es fundamental mitigar los forzantes climáticos de vida media corta (SLCF), particularmente metano (CH<sub>4</sub>) y carbono negro (BC, por sus siglas en inglés), junto con conseguir emisiones globales netas nulas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) hacia el año 2050 (Masson-Delmotte et al., 2018). Esta conclusión del IPCC subraya la necesidad de abordar la mitigación de SLCF de manera coherente con la de CO<sub>2</sub> y otros forzantes climáticos, tal como se plantea en este trabajo.

Por otro lado, hay evidencia que sugiere que abatir SLCF puede facilitar la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), principalmente a través de los cambios tecnológicos y de matriz energética y sus implicancias sobre la calidad del aire (Haines et al., 2017; Melamed et al., 2016; Shindell et al., 2017). En este contexto, se destaca que, al adoptar dichas acciones, se logra disminuir la mortalidad de la población asociada a la mala calidad del aire, particularmente a través de las medidas para reducir los niveles de aerosoles, las cuales se asocian con el BC (Anenberg et al., 2019; Haines y Ebi, 2019; Melamed et al., 2016; Silva et al., 2017).

Lo anterior es de particular importancia en Chile, donde la exposición a material particulado fino, esto es, de diámetro aerodinámico inferior a 2,5 µm (MP2.5), resulta en la muerte de miles de personas cada año (MMA, 2014, 2017; Romieu et al., 2012), y donde la descarbonización de la matriz energética constituye un objetivo en el contexto de la acción climática declarada de Chile (NDC, 2019). La descarbonización conlleva cobeneficios económicos y también sobre la salud de la población cuando se realiza con el objetivo complementario de mejorar la calidad del aire en zonas urbanas (Anenberg et al., 2019; Lacey y Henze, 2015; Li et al., 2018; Markandya et al., 2018; Vandyck et al., 2018; Xie et al., 2018). De hecho, las zonas urbanas constituyen el escenario donde transformaciones profundas y principales deben ocurrir para alcanzar los ODS y los compromisos del Acuerdo de París (Acuto, 2016; Grandin et al., 2018; Lamb et al., 2019).



# Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

## 1. ¿Qué es el carbono negro?

El carbono negro es una forma de aerosoles que contienen carbono. Dicho carbono se genera, principalmente, en condiciones de quema incompleta de combustibles fósiles, biomasa y otros, en presencia de llamas (Bond et al., 2013). Las fuentes de BC también emiten aerosoles orgánicos primarios (POA, por sus siglas en inglés), esto es, compuestos que contienen carbono, hidrógeno y, a menudo, oxígeno. Además, dichas fuentes también emiten gases que pueden dar lugar a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés). La combinación de aerosoles orgánicos y carbono negro se denominan aerosoles carbonáceos.

El carbono negro tiene una estructura similar al grafito y consiste en agregados o cadenas de esférulas de tamaños entre 10 y 50 nm aproximadamente; se volatiliza a 4000 K, (es decir, es refractario), es insoluble en agua y otros solventes; por último absorbe eficazmente la radiación solar en el espectro visible (Bond et al., 2013). En ausencia de un método de medición que permita cuantificar todas sus propiedades, se recomienda usar el término carbono negro en términos cualitativos y usar una terminología específica según el método de medición usado (Petzold et al., 2013). Las formas más comunes de medición de carbono negro se basan en su calidad refractaria y la capacidad absorbente de radiación en el espectro visible e infrarrojo, que corresponden a las técnicas térmicas y los métodos ópticos respectivamente (Chow et al., 2011; Petzold et al., 2013). Ver la Figura 1.

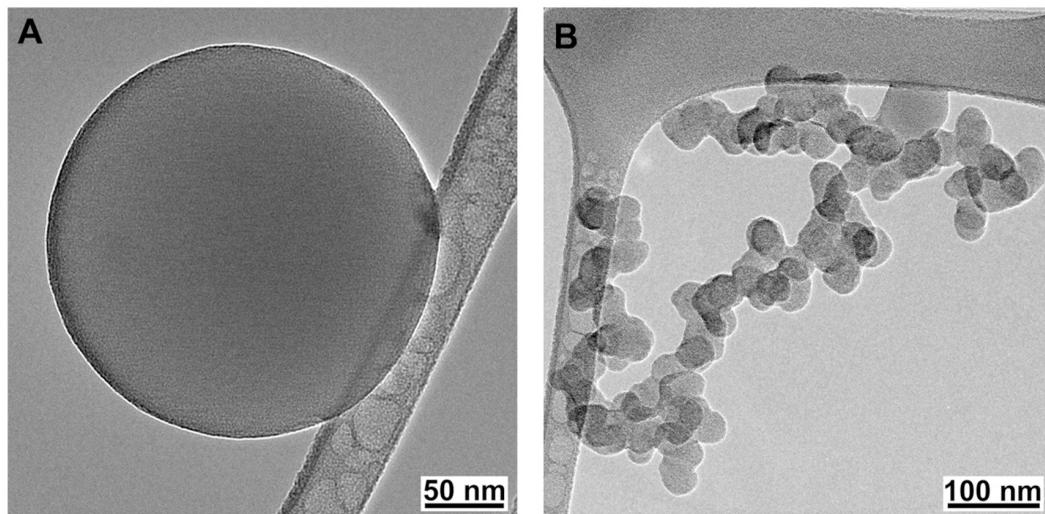


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de partículas de aerosoles atmosféricos. A la izquierda (A) una imagen de carbono marrón (Brown carbon, BrC) y, a la derecha (B), un agregado de esférulas de carbono negro en forma de cadena. Extraído desde Alexander et al., (2008).



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

La característica que hace del carbono negro una sustancia de relevancia climática es, primero, su capacidad de absorber radiación solar dando lugar a calentamiento. A escala global, se estima que el BC da lugar a un forzamiento entre aproximadamente 0.2 y 1 W/m<sup>2</sup> (Gustafsson y Ramanathan, 2016), el cual, en el rango superior, es del mismo orden de magnitud que el forzamiento global por dióxido de carbono pero, como su tiempo de residencia atmosférico es de unos pocos días, su mitigación tiene un efecto inmediato sobre su abundancia en el sistema climático (Masson-Delmotte et al., 2018; Stocker et al., 2013). Cabe destacar que regionalmente dicho forzamiento puede ser hasta dos veces el promedio global e.g., (Mallet et al., 2016; Mena-Carrasco et al., 2014). Segundo, puede afectar la formación y abundancia de nubes alterando la estabilidad atmosférica o actuando como núcleo de condensación de nubes de agua y hielo (Bond et al., 2013; Boucher et al., 2013). Tercero, al depositarse sobre la criósfera puede volver las superficies más absorbentes y acelerar los procesos de derretimiento (Ménégoz et al., 2014; Molina et al., 2015; Rowe et al., 2019). Hay que mencionar que tanto el BC como el polvo o “carbono marrón” (BrC, por sus siglas en inglés) también son aerosoles con un efecto de calentamiento sobre el sistema climático. El BrC se distingue del BC por absorber radiación en un espectro más amplio de longitudes de onda, esto es, no sólo en el visible sino que especialmente en el ultravioleta y por su composición tanto orgánica como inorgánica (Andreae y Gelencsér, 2006; Yan et al., 2018). También, el BrC es de mayor tamaño que el BC (Bond et al., 2013).

### 2. El carbono negro impacta el clima y la salud

La característica que hace del carbono negro una sustancia de relevancia climática es, primero, su capacidad de absorber radiación solar dando lugar a calentamiento. A escala global, se estima que el BC da lugar a un forzamiento entre aproximadamente 0.2 y 1 W/m<sup>2</sup> (Gustafsson y Ramanathan, 2016), el cual, en el rango superior, es del mismo orden de magnitud que el forzamiento global por dióxido de carbono pero, como su tiempo de residencia atmosférico es de unos pocos días, su mitigación tiene un efecto inmediato sobre su abundancia en el sistema climático (Masson-Delmotte et al., 2018; Stocker et al., 2013). Cabe destacar que regionalmente dicho forzamiento puede ser hasta dos veces el promedio global e.g., (Mallet et al., 2016; Mena-Carrasco et al., 2014).

Segundo, el carbono negro puede afectar la formación y abundancia de nubes alterando la estabilidad atmosférica o actuando como núcleo de condensación de nubes de agua y hielo (Bond et al., 2013; Boucher et al., 2013).



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Tercero, al depositarse sobre la criósfera, el carbono negro puede volver las superficies más absorbentes y acelerar los procesos de derretimiento (Ménégos et al., 2014; Molina et al., 2015; Rowe et al., 2019). Hay que mencionar que tanto el BC como el polvo o “carbono marrón” (BrC, por sus siglas en inglés) también son aerosoles con un efecto de calentamiento sobre el sistema climático. El BrC se distingue del BC por absorber radiación en un espectro más amplio de longitudes de onda, esto es, no sólo en el visible sino que especialmente en el ultravioleta y por su composición tanto orgánica como inorgánica (Andreae y Gelencsér, 2006; Yan et al., 2018). También, el BrC es de mayor tamaño que el BC (Bond et al., 2013).

A escala global, se estima que cada año mueren prematuramente, por exposición a material particulado completamente respirable (MP2.5), entre 1,61 y 4,81 millones de personas en el mundo (Lelieveld et al., 2015). Dado que el carbono negro forma parte del MP2.5, la reducción de su abundancia en la atmósfera da como resultado un menor riesgo a la exposición de aerosoles o partículas en la población, sobre todo, porque se han identificado impactos sobre la salud humana atribuibles directamente al carbono negro, e.g., (Nichols et al., 2013). No obstante, en general, resulta difícil distinguir los efectos específicos del BC (Kirrane et al., 2019).

En la Figura 2 se sintetizan varias de las características e impactos asociados al carbono negro. Es evidente, entonces, que la mitigación de las fuentes de carbono negro y material particulado es beneficiosa para la salud y potencialmente para el clima. Hay que tener presente, empero, que la reducción de ciertas fuentes de BC también llevará a la reducción de carbono orgánico, generalmente un agente de enfriamiento, así como de precursores de aerosoles reflectantes como sulfatos o nitratos. Por lo tanto, no todas las medidas tienen un efecto positivo sobre el clima y deben ser adecuadamente ponderadas (Bond et al., 2013).



# Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

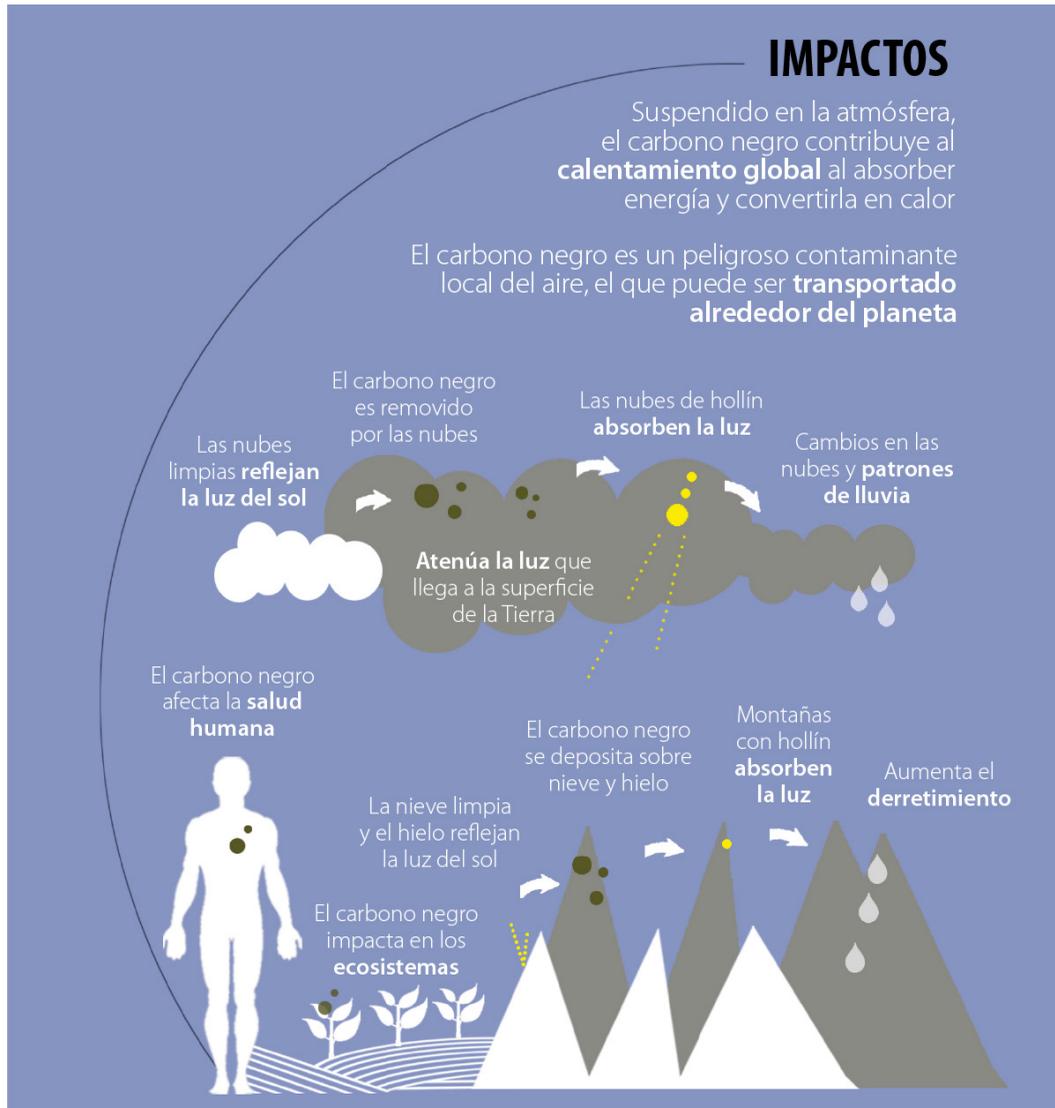


Figura 2. Esquema de los múltiples impactos asociados al carbono negro. La figura se basa en una análoga presentada por la Coalición del Aire Limpio y el Clima (<https://www.ccacoalition.org/en/slcp/soot-black-carbon>).



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### 3. ¿De dónde viene el carbono negro?

Como ya se dijo, el carbono negro se origina principalmente en condiciones de quema incompleta de combustibles fósiles, biomasa y otros, en presencia de llamas. Estimaciones globales de emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro, indican que hacia el año 2010 se emitían 7,2 Tg de BC en el mundo, correspondiendo a alrededor de un 15% de las emisiones globales de MP2.5 (Klimont et al., 2017). Un inventario global reciente, desarrollado para estudios climáticos, muestra la evolución de las emisiones de aerosoles carbonáceos – orgánico (OC, por sus siglas en inglés) e inorgánico (BC) – entre los años 1750 y 2014, indicando un crecimiento significativo desde la época preindustrial (Hoesly et al., 2018). Estos estudios muestran que, a escala global, las emisiones de BC se asocian mayoritariamente a los sectores residencial, transporte, energía, industria y quema de desechos (Figura 3). En América del Sur, se estima que en 2010 se emitían alrededor de 0,75 Tg de BC, de los cuales un 55% correspondía a quema de biomasa y, el resto, a otras fuentes antrópicas e.g., (Molina et al., 2015).

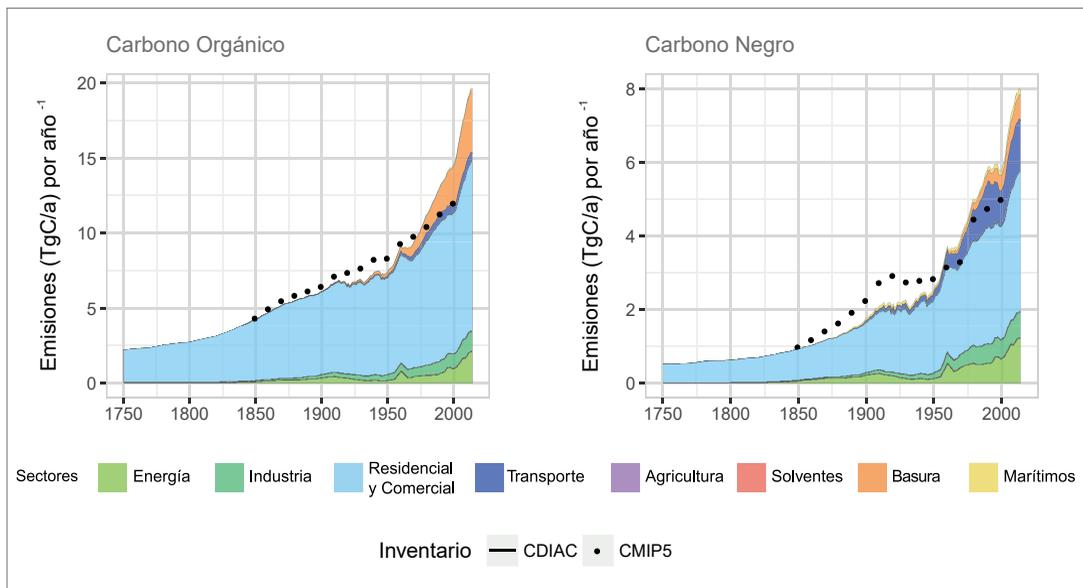


Figura 3. Evolución de las emisiones globales de carbono orgánico (OC) y carbono negro (BC) por sectores entre los años 1750 y 2014. También se indica la evolución según otros inventarios globales, incluyendo el usado en las simulaciones climáticas presentadas en Stocker et al. (2013). La figura se adaptó a partir de Hoesly et al. (2018).



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

A petición del Ministerio del Medio Ambiente, en 2017 se generó el primer inventario de emisiones de carbono negro para Chile considerando como año base 2013 (GreenlabUC, 2016). Este inventario contempló los sectores transporte, maquinaria fuera de ruta (MFR), calefacción a leña, generación de electricidad, consumo de energía en industrias, entre otros, sumando 22,6 kton de BC para el año 2013. La quema de leña se estimó responsable de un 45 % de dichas emisiones. Luego, en el Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2018), se estimó la evolución de las emisiones de BC para el período entre 1990 y 2016. Dicho inventario consideró los niveles de actividad que se utilizan para estimar gases de efecto invernadero, complementados por aquellos provistos en (GreenlabUC, 2016) y usando factores de emisión de la literatura. De acuerdo con este inventario, las emisiones de BC en 2016 sumaban 17,7 kton.

En el presente estudio, las emisiones de BC se estiman para los siguientes sectores: 1) Comercial, público y residencial (CPR); 2) Consumo propio, vale decir, el consumo energético de los sectores productores de energía; 3) Industria; 4) Maquinaria fuera de ruta (MFR) con potencia inferior a 560 kW; 5) Minería; 6) Transporte (terrestre); y 7) Generación de electricidad. También se hace una estimación de las emisiones de los sectores: marítimo, aéreo y de maquinaria fuera de ruta con potencias superiores a 560 kW de potencia. Pero las mismas se excluyen de las proyecciones, pues estas no están contempladas en los escenarios provistos para la mitigación de gases de efecto invernadero (NDC, 2019; Palma Behnke et al., 2019). Además, una caracterización detallada de las mismas requeriría de la recolección y análisis de información que excede el alcance de este estudio. No obstante, los mismos pueden tener impactos relevantes en el clima y en la calidad del aire, estando sujetos a un creciente escrutinio y a iniciativas nacionales e internacionales de mitigación, e.g., (Blakey et al., 2011; Farías et al., 2019; Johansson et al., 2017; Lund et al., 2017; Smith y Ahmad, 2018; Sofiev et al., 2018).

La metodología de estimación de emisiones de carbono negro de este estudio se resume en la Tabla 1. Vale hacer notar que los sectores son consistentes con los usados en (MMA, 2018), excepto MFR. Este último se estima, en este trabajo, a partir del consumo energético para usos motrices de los sectores industria y minería., excluyendo maquinaria de más de 560 kW. Además, se incluye una estimación, hecha separadamente, para maquinaria de más de 560 kW. En la Figura 4 se ilustran las contribuciones sectoriales del presente inventario, excluyendo los sectores: aéreo y marítimo y de maquinaria fuera de ruta de más de 560 kW. Las emisiones totales de BC en 2016 corresponden a 10 kton/a para los sectores 1 a 7. Las emisiones de los sectores aéreo y marítimo y de MFR de más de 560 kW corresponden a 0,1 y 0,9 y 2 kton/a de BC, respectivamente. La Figura 4 también ilustra la diferencia de las contribuciones relativas de los sectores a las emisiones de gases de efecto invernadero y de aerosoles, en este caso, carbono negro.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Sector	Datos de actividad	Factores de emisión	Estimación (kton/a)	Observación
Comercial, Público y Residencial.	Demanda energética según NDC (2019)	Literatura según se especifica al final de este informe	3,8	Predomina el uso de leña en el sector residencial.
Consumo propio			$5 \times 10^{-2}$	Prevalece el uso de electricidad y gas natural.
Industria			1,7	Se consideró abatimiento en el sector de papel y celulosa de 90 %. En la categoría "industrias varias" existe un significativo uso de leña. Se resta el uso motriz de diésel.
Maquinaria fuera de ruta	Demanda energética de los sectores industria y minería para usos motrices en base a diésel	(GreenlabUC, 2016)	2,8	Se deriva del uso motriz de diésel de industria y minería. Excluye maquinaria de más de 560 kW La proyección se basa en GEASUR (2014)
Minería	Demanda energética según (NDC, 2019)	Literatura según se especifica al final de este informe.	0,7	Se resta el uso motriz de diésel
Transporte	Consumo energético por tecnología vehicular, considerando toneladas por kilómetro (TKM) y pasajeros transportados por kilómetro (PKM).	(SECTRA, 2014)	1,0	La demanda energética de hidrógeno se considera como emisiones nulas y no contribuye a la actividad (TKM, PKM)
Generación de electricidad	Generación de electricidad por tecnologías para satisfacer la demanda energética de los distintos sectores.	Literatura según se especifica eal final de este informe.	0,1	Supone uso de sistemas de abatimiento y control eficientes.
Aéreo	Demanda energética según NDC (2019)	(SECTRA, 2014)	0,1	No forma parte del paquete de medidas contempladas en NDC (2019).
Marítimo			0,9	

Tabla 1. Resumen de metodología usada en el presente estudio para estimar las emisiones sectoriales de BC para el año 2016.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

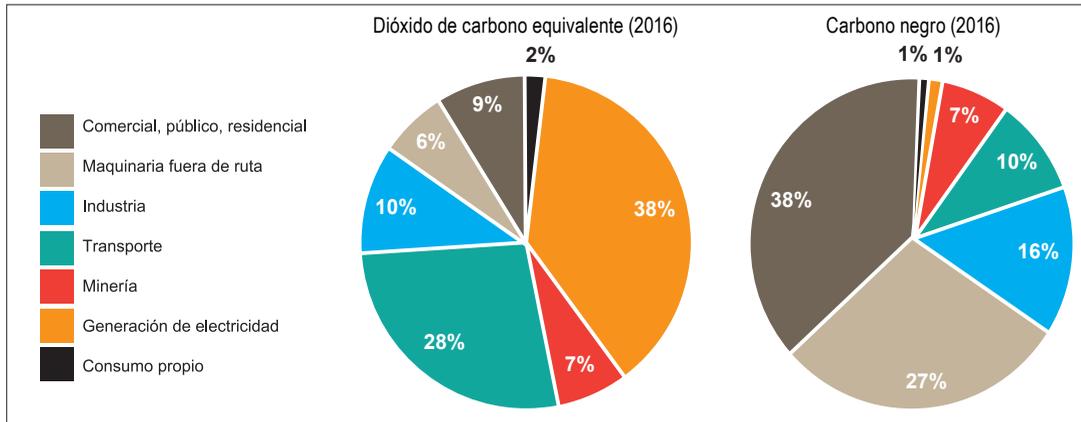


Figura 4. Participación relativa de los diferentes sectores para las emisiones de CO<sub>2</sub>eq (panel superior) y BC (panel inferior) para el año 2016. El total de emisiones de CO<sub>2</sub>eq y BC para el año 2016 corresponden a 75 Mton de CO<sub>2</sub>eq y 10 kton de BC, excluyendo los sectores: aéreo, marítimo y maquinaria fuera de ruta de potencia mayor a 560 kW.

La Tabla 2 muestra una comparación de las emisiones de BC para 2016 entre el inventario del Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2018) y el del presente estudio, así como la clasificación correspondiente del IPCC (Penman et al., 2006). En la tabla se indican brevemente las razones que explican las diferencias entre ellos.

Los inventarios de BC presentados en la Tabla 2 consideran totales nacionales sin considerar la diversa distribución espacial de las fuentes para cada sector. Dado que el carbono negro tiene un tiempo de residencia atmosférica que varía entre horas y días, su distribución e impacto es de escala regional. Por lo tanto, la distribución de las fuentes de carbono negro debe tenerse en cuenta a la hora de determinar sus impactos y diseñar medidas de mitigación. En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de las emisiones de carbono negro basada en la distribución estimada de MP<sub>2.5</sub> asociadas a los sectores residencial y transporte (Huneus, com. personal). Esta imagen permite inferir que la mitigación de dichos sectores tendrá impactos heterogéneos en el territorio continental de Chile.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Código IPCC	Sector IPCC	(MMA, 2018) kton BC	Este trabajo kton BC	Sectores incluidos	Razón de la diferencia
1.A.1.	Industrias de la energía	0,2	0,1	-Generación de Electricidad -Consumo Propio	Se usó un factor de emisión distinto, respaldado en la literatura científica (Bond, 2004).
1.A.2.	Industrias manufactureras y de la construcción.	9,7	5,2	-Industria -MFR -Minería	Se supone abatimiento de partículas en las industrias de papel y celulosa, las que tienen el 75 % de las emisiones de BC en este grupo.
1.A.3.	Transporte	3,0	2,0	-Transporte -Aéreo -Marítimo	Se considera disminución de partículas según normativa vehicular más reciente.
1.A.4.	Otros (incluyendo el sector residencial)	4,8	3,8	-Comercial -Público -Residencial	Pesca se incluyó en Industria (1.A.2).  Considera un consumo de leña menor, según datos provistos por el MMA para este estudio.
	<b>Total</b>	<b>17,7</b>	<b>11,1</b>		

*Tabla 2 Emisiones de carbono negro del año 2016 del sector energía agrupados según códigos del IPCC (kton). Aquí se compara la estimación original y la corregida por este trabajo. Notar que aquí sí se muestran los sectores aéreo y marítimo.*



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

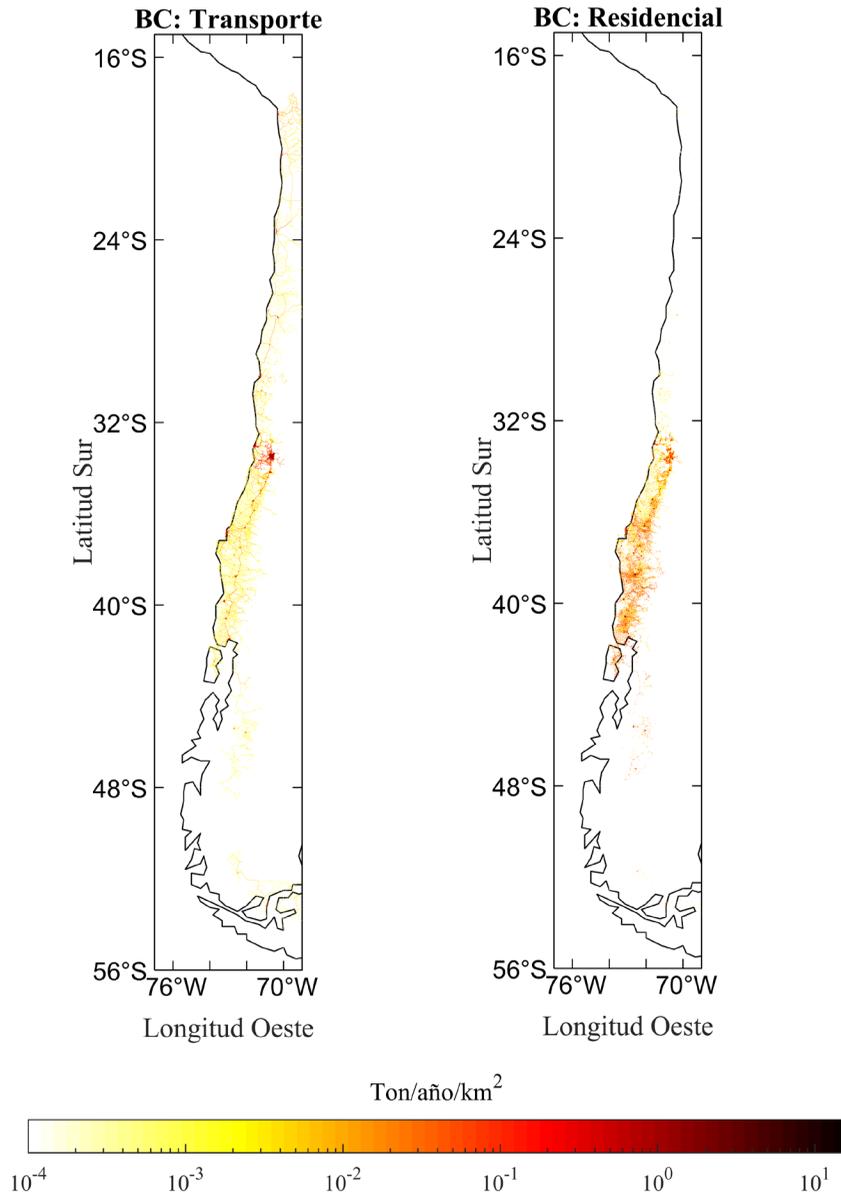


Figura 5. Distribución espacial sobre el territorio continental de Chile de las emisiones de carbono negro y/o material particulado completamente respirable para el año 2016 con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>. A la izquierda se presenta el sector transporte y, a la derecha, el sector residencial. Mientras el primero refleja la distribución caminera y la densidad de flujos vehiculares, el segundo sigue la distribución de la población y, en primer orden, el uso de leña en la zona central y sur de Chile. Esta distribución es un producto desarrollado por Nicolás Huneeus et al. Los flujos de emisiones, sumados sobre todo el territorio, corresponden a las sumas anuales de emisiones de los sectores transporte y residencial indicados en la Tabla 2.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### II. ¿CÓMO SE PROYECTARON LOS ESCENARIOS DE MITIGACIÓN DE CARBONO NEGRO?

Primero se revisaron múltiples documentos de política pública para identificar medidas relevantes para la mitigación de carbono negro. Luego, en la medida que los escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero que se incluyen en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile ante el Acuerdo de París (NDC, 2019), fueron puestos a disposición del Ministerio del Medio Ambiente, se identificaron un subconjunto de medidas relevantes para la mitigación de carbono negro. Las mismas fueron incorporadas en una herramienta de simulación de escenarios energéticos e impactos usada en el contexto de iniciativas de acción y planificación nacional (*Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants, SNAP*), que promueve la Coalición de Aire Limpio y Clima (CCAC, <https://www.ccacoalition.org/>). A ello se agregaron medidas derivadas de los planes de descontaminación vigentes, especialmente aquellos asociados al consumo de leña residencial, transporte y maquinaria fuera de ruta.

#### 1. Herramienta de proyección de escenarios y evaluación de impactos

Para la evaluación de escenarios energéticos, en el presente estudio se ha adoptado el modelo *Long Range Energy Alternatives Planning System - Integrated Benefits Calculator* (LEAP-IBC) (<https://www.energycommunity.org/>). Este modelo está orientado a su uso por parte de planificadores y analistas con un enfoque al sector energético, donde también se pueden incluir variables no energéticas. El sistema se puede obtener a través de internet, con la opción de contar con distintas licencias de usuario gratuitas o pagas.

LEAP-IBC consiste en dos partes. La primera es LEAP, y es la que permite calcular diferentes consumos o demandas energéticas y estimar emisiones en base a estos consumos o demandas. El sistema LEAP es usado en diversos lugares del mundo e.g., (Emodi et al., 2017; Grande-Acosta y Islas-Samperio, 2017; Hong et al., 2016; Hu et al., 2019) Eso le da la ventaja de haber sido usado por diversos usuarios y en variadas condiciones, cuestión que le da robustez metodológica. Pero más allá de los métodos, subyace como factor limitante la calidad de la información de entrada, por ejemplo, proyecciones de crecimiento económico o de demanda energética o factores de emisión u otros.

La segunda parte es IBC y corresponde al complemento que incluye los sectores no energéticos. El mismo también calcula diferentes beneficios en base a las emisiones estimadas desde LEAP. En el caso de impactos sobre la mortalidad se usan los métodos descritos en (Anenberg et al., 2010). Esencialmente, los estudios epidemiológicos establecen un llamado riesgo relativo (RR) que permite estimar la fracción de la morbilidad



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

o la mortalidad observada atribuible a un factor de riesgo específico, en este caso, la presencia de contaminantes. Esto requiere conocer la relación entre la concentración y la respuesta en términos de morbilidad o mortalidad. El mismo se deriva empíricamente de sendos estudios epidemiológicos, típicamente, estudios de cohorte, la mayoría de los cuales provienen de Estados Unidos de América y Europa (Burnett et al., 2014). Estos métodos se han utilizado previamente, tanto para el caso de ozono como del carbono negro (CCAC y UNEP, 2018; UNEP y WMO, 2011). Como ya se dijo, las relaciones entre dosis y respuesta o entre exposición y respuesta considerados no son necesariamente representativos, entre otros, por los niveles de concentración para los cuales fueron desarrollados y los confundentes asociados a la salud de cada población (Anenberg et al., 2016; Hasenkopf, 2016). Adicionalmente a los problemas derivados de la determinación de la relación entre dosis y respuesta, en el caso de Chile continental, dada su topografía compleja, resulta particularmente difícil estimar los niveles de material particulado a los que está expuesta la población basándose en modelos globales como los que subyacen a la herramienta en uso (Henze et al., 2007). Estudios recientes usan resultados de modelos globales que simulan la calidad del aire, pero que se han “corregido” con inferencias satelitales de la distribución de material particulado e.g., (Alvarado et al., 2019; Anenberg et al., 2019; van Donkelaar et al., 2010; Shaddick et al., 2018). Esta nueva aproximación resulta prometedora, pero la misma no está disponible al momento de escribir este informe. Con todo, la estimación de impactos sobre la mortalidad por carbono negro en uso no cuenta con una contextualización nacional ni una distribución espacial suficiente para realizar una proyección confiable. No obstante, como ya se indicó, es amplia la evidencia del impacto nocivo del material particulado completamente respirable en la salud de la población.

### 2. Escenarios y medidas de mitigación evaluadas para carbono negro

Para este estudio se evaluaron tres escenarios de mitigación: a) Políticas actuales; b) Carbono neutralidad y c) Carbono neutralidad+. Cada uno de ellos se explica a continuación, y en la Tabla 3 se muestran las medidas consideradas en cada uno.

#### a. Escenario políticas actuales

El escenario políticas actuales consiste en proyecciones de consumo energético desde el año 2016 hasta el 2050, en el cual se consideran las medidas de mitigación que afectan los consumos de energía. Estas medidas se encuentran actualmente en implementación o en fase de planificación, considerándose altamente probable su implementación (Palma Behnke et al., 2019). Estas medidas ya se consideraron en Tercer Informe Bienal (MMA, 2018).



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### **b. Escenario carbono neutralidad**

El escenario carbono neutralidad consiste, al igual que el escenario anterior, en proyecciones de consumo energético desde el 2016 al 2050. El mismo se deriva de la proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales, a su vez, resultan de las medidas de mitigación contempladas en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile (NDC, 2019; Palma Behnke et al., 2019). Dichas medidas son mayoritariamente de carácter tecnológico y de cambio de fuentes de energía. La proyección correspondiente para carbono negro se reconstruyó a partir de las emisiones totales de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , usando una relación simple entre los consumos energéticos y las emisiones del escenario políticas actuales, para estimar los consumos energéticos del escenario de carbono neutralidad.

### **c. Escenario de carbono neutralidad +**

El escenario de carbono neutralidad + contempla dos medidas adicionales a las del escenario de carbono neutralidad. Como se verá en la sección siguiente, la carbono neutralidad resulta en una reducción sustantiva de las emisiones nacionales de carbono negro. No obstante, como esas medidas no consideran la quema de leña, pues la misma se supone neutral en términos de dióxido de carbono, el escenario no resulta en beneficios relevantes en términos de calidad de aire y salud en zonas urbanas. El escenario de carbono neutralidad tampoco aporta de modo sustancial a enfrentar la pobreza energética que afecta a más de un millón de hogares en la zona central y sur del país (Billi et al., 2018). Por ello, para enfatizar la mitigación en zonas urbanas, se decidió añadir dos medidas.

La primera medida añadida es calefacción distrital, la cual emerge de las políticas de sostenibilidad energética y ambiental, e.g., (EBP, 2018). Este escenario supone implícitamente un esfuerzo coordinado y de gran escala de parte del Estado para superar la pobreza energética que afecta a una parte significativa de nuestros ciudadanos. La misma es una medida de carácter transformacional coherente con abordar los problemas de inequidad socioambiental que afectan a Chile, afín a paliar los impactos de la contaminación atmosférica domiciliar y extradomiciliar, y a disminuir nuestra vulnerabilidad ante el cambio climático, e.g., (Krellenberg et al., 2017; Smith y Henríquez, 2019). De todas formas, todas estas medidas deben ser evaluadas y ponderadas más allá de costos de inversión o factibilidad tecnológica y deben considerar, en su diseño elementos sociales y culturales, e.g., (Amigo-Jorquera, 2019).

La segunda medida de mitigación se refiere a la aplicación de una norma de emisión más exigente que la actual para la maquinaria fuera de ruta (<http://bcn.cl/1yok8>). Una norma de estas características se encuentra en discusión en el Ministerio del Medio Ambiente. Hay que hacer notar que un 46 % de las emisiones de  $\text{CO}_2$  del sector MFR corresponde a la



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

actividad relacionada con la construcción (GEASUR, 2014). En nuestro estudio, suponemos que la construcción ocurre mayoritariamente en zonas urbanas, siendo una medida relevante en dicho contexto.

Con todo, suponemos:

- **Calefacción distrital:** Esta medida contempla un cambio de la calefacción tradicional a leña (estufa a leña) a un sistema de calefacción distrital, el cual conlleva una reducción en el consumo de energía por vivienda y reducción de las emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro. El supuesto utilizado en este caso fue que las regiones con mayor consumo de leña (regiones VII, VIII, IX, X y XIV), e.g., (Schueftan et al., 2016) pasan desde la condición actual con calefacción a leña, a un sistema de calefacción distrital en un 100 % al año 2050, aumentando linealmente la penetración de esta tecnología. De esta forma, el consumo de leña por medio de una estufa tradicional se elimina al 2050.
- **Normativa para maquinaria fuera de ruta:** Esta medida supone la implementación de una nueva normativa, más estricta, para maquinaria fuera de ruta, suponiendo una entrada en vigor desde el año 2021. Esta norma se aplica a maquinaria de potencia inferior a 560 kW.

Medida	Políticas actuales	Carbono neutralidad	Carbono neutralidad +	Explicación
Estrategia de electromovilidad.	X	X	X	40 % de la flota de vehículos particulares eléctricos al 2050. 100 % de transporte público eléctrico al 2040.
Estándares viviendas nuevas	X	X	X	Nuevas normativas de construcción. Se espera que las viviendas nuevas consuman un 35 % menos al 2040 que las viviendas actuales.
Electrificación en calefacción residencial.		X	X	Al 2050, el 39 % de la calefacción es por medio de electricidad.
Sistemas solares térmicos en industrias y minería.		X	X	Se incluye la energía solar como energético.
Electrificación en usos motrices en industrias y minería.		X	X	Inclusión de hidrógeno en usos motrices industriales y mineros.
Calefacción distrital			X	100 % de calefacción distrital al 2050 en las regiones con mayor consumo de leña.
Normativa maquinaria fuera de ruta			X	Nueva normativa para MFR de menos de 560 kW de potencia.

Tabla 3. Medidas de mitigación de carbono negro consideradas en cada escenario: Políticas actuales, Carbono neutralidad y Carbono neutralidad +, según se discute en el texto. La X indica la consideración de cada medida en los escenarios.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### III. PROYECCIÓN DE LAS EMISIONES DE CARBONO NEGRO PARA CHILE

Como ya se mostró, en este estudio se contemplan dos escenarios de mitigación, i.e., carbono neutralidad y carbono neutralidad +. Los mismos se comparan con el escenario de políticas actuales. La Figura 6 ilustra la evolución temporal de las emisiones de dióxido de carbono equivalente y carbono negro para los tres escenarios antes discutidos, excluyendo los sectores aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta de la gran minería. Al año 2030, los porcentajes de reducción con respecto al escenario políticas actuales para los escenarios carbono neutralidad y carbono neutralidad + son, en el caso de carbono negro, de 13 % y 37 %, respectivamente. Al 2050, las reducciones alcanzan 49 % y 75 %, respectivamente.

La Figura 6 muestra que el escenario de carbono neutralidad diseñado para gases de efecto invernadero, expresados como  $CO_{2eq}$ , resulta en una disminución sustantiva de las emisiones de carbono negro (BC) en el territorio nacional continental. También es claro que mientras el escenario de carbono neutralidad + reduce significativamente el BC, tiene un efecto marginal sobre  $CO_{2eq}$  pues, por un lado, la quema de leña para calefacción residencial se supone neutra en términos de dióxido de carbono y, por otro lado, la maquinaria fuera de ruta es una fuente de magnitud relativamente menor para los gases de efecto invernadero. Sin embargo, como ya se advirtió e ilustró en la Figura 4 y Figura 5, los sectores que más contribuyen a  $CO_{2eq}$  son diferentes a los sectores correspondientes para BC. Además, la distribución espacial de dichos sectores de emisión también difiere, y eso, sumado a sus distintos tiempos de residencia atmosféricos de estas trazas, resulta en impactos diferenciados. En otras palabras, al mitigar  $CO_{2eq}$ , independientemente del sector y la ubicación de las fuentes, el beneficio es global, mientras que al mitigar carbono negro, los efectos sólo son a escala regional, tanto en la salud como en el clima. Por lo tanto, en la mitigación se deben considerar medidas con impacto urbano como las consideradas en el escenario de carbono neutralidad +.

La mitigación de gases de efecto invernadero también conlleva a la reducción de otras trazas contaminantes, no sólo carbono negro. Una estimación de dichas reducciones se ilustra en la Figura 7. Esta estimación se hace usando la misma herramienta (LEAP-IBC) y considerando los mismos escenarios antes descritos.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

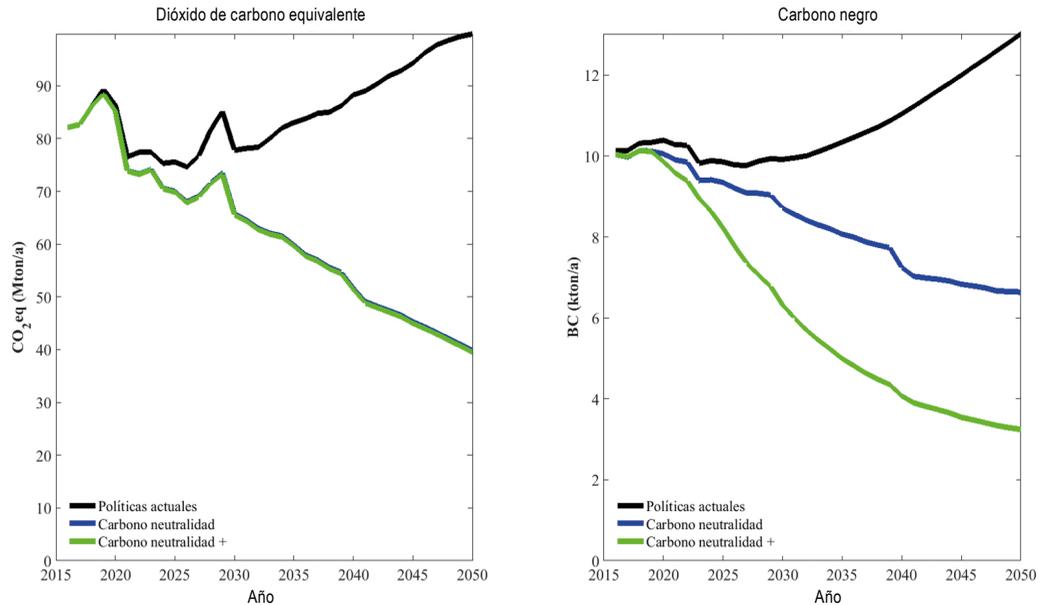


Figura 6. Trayectorias de emisiones de  $CO_{2eq}$  y BC entre 2016 y 2050, considerando políticas actuales (línea negra), carbono neutralidad (línea azul) y carbono neutralidad + (línea verde). Estas trayectorias no contemplan a los sectores: aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta con potencia superior a 560 kW.

El material particulado completamente respirable (fino), como es de esperar, coevoluciona con el carbono negro y el carbono orgánico, pues estos últimos son fracciones del primero. El monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles siguen trayectorias similares entre sí y con el material particulado, pues todos se asocian a la quema incompleta de combustibles. La quema de leña constituye para estos contaminantes una fuente relevante (Cf. Figura 4) y, por lo tanto, el escenario de carbono neutralidad + se expresa en mayor mitigación que el escenario de carbono neutralidad. Las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyen con la carbono neutralidad en tanto disminuyen las contribuciones del sector transporte y de las termoeléctricas. Pero llama la atención que no se observe una mayor disminución con la medida de calefacción distrital, pues la quema de leña sí se asocia con emisiones de óxidos de nitrógeno, e.g., (Padilla-Barrera et al., 2019). Las proyecciones para dióxido de azufre siguen las de gases de efecto invernadero y se asocian al consumo de combustibles fósil en la industria. El sector transporte no pesa significativamente pues, en general, ese combustible tiene bajas tasas de azufre. Cabe señalar que los escenarios no contemplan reducciones de las emisiones asociadas a la fundición de metales, cobre en particular, sector que constituye la principal fuente de azufre oxidado en Chile.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Globalmente, el amoníaco se asocia al sector agropecuario, incluyendo uso de fertilizantes y excreta animal, y al sector industrial, incluyendo la producción de fertilizantes (Van Damme et al., 2018). La quema de biomasa y fuentes como tránsito vehicular, plantas de tratamiento de agua y basura son de importancia en las zonas urbanas (Sun et al., 2017; Toro et al., 2014). En este estudio se hizo una estimación de las emisiones de amoníaco asociadas al sector residencial (leña), industria y minería, y producción de energía, pero se excluyó transporte y actividades agropecuarias, siendo la leña el sector dominante (cerca de un 93 %) entre ellos. Por ello, la introducción de calefacción distrital resulta tan relevante en esta estimación. Hay que tener presente que el  $\text{NH}_3$  es un precursor de material particulado, el cual, a su vez, tiene impactos tanto sobre la salud como sobre el clima a escala regional y, por ende, debiera ser mejor caracterizado.

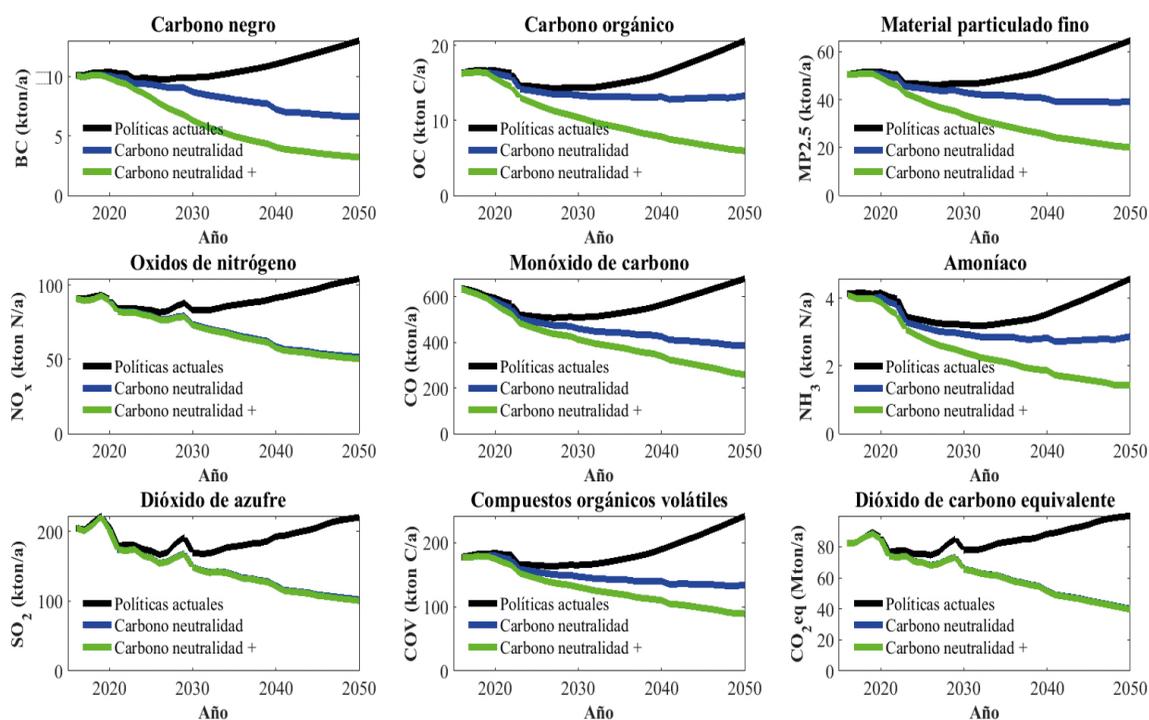


Figura 7. Trayectorias de emisiones de trazas contaminantes y gases de efecto invernadero entre 2016 y 2050, considerando políticas actuales (línea negra), carbono neutralidad (línea azul) y carbono neutralidad + (línea verde). Estas trayectorias no contemplan a los sectores: aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta con potencia superior a 560 kW.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### IV. ¿CÓMO HACER EL SEGUIMIENTO?

El seguimiento de los compromisos de mitigación corresponde a una acción clave para garantizar que las emisiones se reduzcan efectivamente. Para ello se debe realizar un procedimiento de medición, reporte y verificación (MRV). Esto sirve para identificar fuentes, caracterizar trayectorias de emisiones, diseñar estrategias de mitigación, y, ciertamente, para dar transparencia y credibilidad a los procesos, permitiendo corregir el curso en el caso de ser necesario (WRI, 2016). Las iniciativas de MRV pueden referirse al seguimiento de emisiones, acción climática o de financiamiento.

Bajo la Convención Marco de Cambio Climático, Chile debe comunicar a la Conferencia de las Partes (COP) información relevante para la implementación de los acuerdos, en particular los compromisos de mitigación. En nuestra opinión es recomendable utilizar la misma aproximación, incorporando ahora un MRV para carbono negro y, posiblemente otros forzantes de vida media corta y sus precursores. Esto se vuelve imprescindible al momento que Chile está comprometiendo una meta de carbono negro, la cual debe ser medible, reportable y verificable en su Contribución Nacionalmente Determinada.

Chile ya ha desarrollado varias iniciativas que permitirían realizar un seguimiento específico a las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero, las que debieran extenderse a carbono negro. Las iniciativas y modificaciones sugeridas se muestran en la Tabla 4. Adicionalmente, se recomienda incluir otras medidas atinentes al carbono negro. En particular, sistemas MRV específicos para los sectores de transporte y maquinaria fuera de ruta. Dichos sistemas debieran dar cuenta de las estimaciones nacionales y regionales, pues, como se ha ilustrado, para las emisiones de carbono negro es importante considerar la distribución espacial.

La heterogeneidad espacial y temporal que caracteriza a trazas como el carbono negro y precursores de forzantes climáticos de vida media corta hace necesario abordar el desarrollo de inventarios de emisiones de alta resolución (ca. 1 km<sup>2</sup>), coherentes con los inventarios nacionales y cuya puesta al día sea consistente en el tiempo. Esto es crucial y estratégico en un escenario de crecientes emisiones de gases de efecto invernadero en urbes, muchas de las cuales coemiten forzantes climáticos de vida media corta (Lamb et al., 2019; Nangini et al., 2019; Pichler et al., 2017). También se requiere ampliar el alcance de las mediciones de las concentraciones, propiedades ópticas y flujos de emisión de estas trazas (Anenberg et al., 2019; Hutyra et al., 2014; Mitchell et al., 2018; Nangini et al., 2019). Por lo tanto, adicionalmente al seguimiento de actos administrativos, construcción y manutención de inventarios de emisiones y revisión regular de listados de medidas, se hace necesario aumentar la medición de trazas. En el caso de las zonas urbanas de Chile, debiera contarse, al menos, con monitores ópticos de carbono negro, tales como aetalómetros



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

o espectrómetros de absorción multiángulo en, al menos, una estación de cada red de monitoreo urbana. Ello sería complementario a la caracterización de composición e.g., (Barraza et al., 2017), preferentemente segregada por tamaño de aerosoles completamente respirables, e.g., (Tagle et al., 2018).

Finalmente, el MRV de las acciones de mitigación para carbono negro deben incluir el impacto de las mismas sobre los objetivos de desarrollo sostenible ODS (WRI, 2016) y el progreso en la implementación de las medidas de mitigación. En el caso del carbono negro y otros forzantes de vida media corta y sus precursores, se requiere de una coordinación estrecha con las autoridades responsables de los planes de prevención y descontaminación de la calidad del aire, de desarrollo urbano (vivienda, transporte, etc.), de energía y, ciertamente, de quienes hacen el seguimiento de los ODS, así como de los responsables de la acción climática. Así, se hará necesario contar con planes de descontaminación que consideren en su concepción cobeneficios climáticos, y planes de mitigación y adaptación climática que den cuenta de sus impactos sobre la calidad del aire.



Es posible que esto requiera de modificaciones legales en tanto los planes de descontaminación se aplican a determinadas zonas según se constata la excedencia de normas de calidad y, la adopción Acuerdo de París en Chile no define los mecanismos para conseguir las metas y aplicar medidas de mitigación específicas. La discusión de la Ley de Cambio Climático puede abrir una oportunidad para abordar esta materia.

Tabla 4. Iniciativas MRV ya adoptadas por Chile. Se indica brevemente cómo se aplicaría o extendería al caso de carbono negro.

INICIATIVA	CÓMO ABORDARÍA BC
<p><b>Programa de fomento de capacidades en desarrollo bajo en emisiones</b> (<i>Low Emission Capacity Building, LECB</i>) (UNDP-MMA, 2016)</p> <p><b>Institución Responsable</b> Ministerio del Medio Ambiente, MMA</p>	<p>Inclusión de carbono negro en el Sistema Nacional de Inventarios (<a href="http://snichile.mma.gob.cl/">http://snichile.mma.gob.cl/</a>)</p> <p>Incorporar reglas de contabilidad de emisiones de carbono negro.</p> <p>Inclusión de MRV para BC en la plataforma centralizada que contempla la iniciativa.</p>
<p><b>Impuesto al dióxido de carbono, material particulado, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono</b> (Impuesto verde) (<a href="http://bcn.cl/1zh10">http://bcn.cl/1zh10</a>)</p> <p><b>Institución Responsable</b> Superintendencia del Medio Ambiente, SMA Ministerio de Hacienda</p>	<p>La ley debiera modificarse para incorporar carbono negro.</p>



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

INICIATIVA	CÓMO ABORDARIA BC
<p><b>Acciones de mitigación del sector energía</b> (Precio al carbono, <a href="http://www.precioalcarbonochile.cl/">www.precioalcarbonochile.cl/</a>)</p> <p><b>Institución Responsable</b> Ministerio de Energía</p>	<p>Existen estudios para la implementación de un sistema MRV para la mitigación de gases de efecto invernadero para los sectores generación de electricidad, industrial y de la minería, y comercial, público y residencial. Dicho MRV debiera ser ampliado a carbono negro.</p>
<p><b>Comuna Energética</b></p> <p><b>Institución Responsable</b> Ministerio de Energía</p>	<p>Este programa busca apoyar a los municipios a elaborar estrategias energéticas locales con planes de acción ideados desde la comunidad, otorgando el Sello Comuna Energética. El mismo considera un MRV para gases de efecto invernadero, el que debiera extenderse a aerosoles, carbono negro en particular, en conexión con el sector residencial.</p>
<p><b>Proyectos de reacondicionamiento de viviendas existentes en el marco del proyecto</b> <a href="http://www.worldbank.org/en/programs/ndc-support-facility">www.worldbank.org/en/programs/ndc-support-facility</a></p> <p><a href="http://www.esmap.org/57d2486f-30ec-49b0-a8e9-5e025dbadea3">www.esmap.org/57d2486f-30ec-49b0-a8e9-5e025dbadea3</a></p> <p><b>Institución Responsable</b> Ministerio de Energía</p>	<p>En este marco se está desarrollando un sistema MRV que permita monitorear ahorros de consumo energético y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero reducidas debido a la implementación de medidas de eficiencia energética aplicadas a través de reacondicionamiento de viviendas. El mismo debiera ampliarse a carbono negro.</p>
<p><b>Certificado de Ahorro de Proyectos Energéticos (CAPE)</b> <a href="https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp">https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp</a></p> <p><b>Institución Responsable</b> Agencia de Sostenibilidad Energética</p>	<p>La iniciativa contempla un protocolo internacional para facilitar los informes de resultados energéticos y de mitigación de gases de efecto invernadero para proyecto energéticos. La certificación está diseñada para que empresas, instituciones, organismos o similares, que cuenten con proyectos energéticos en sus instalaciones, puedan validar las reducciones de consumo reales como consecuencia de su implementación. Esto debiese ser extendido a carbono negro.</p>



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### V. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Este trabajo ha abordado el diseño, evaluación y justificación de una meta de reducción cuantificada de carbono negro, integrable y consistente con la meta de reducción de gases de efecto invernadero contemplada en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de Chile ante el Acuerdo de París.

Para ello, se ha revisado la literatura científica y técnica internacional junto con documentos de política pública chilena para identificar medidas atinentes a la mitigación de carbono negro. También se utilizó una herramienta (LEAP-IBC) para la construcción de escenarios de emisiones y su proyección en el contexto de iniciativas de acción y planificación nacional (*Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants*, SNAP) que promueve la Coalición de Aire Limpio y Clima (CCAC) de la cual Chile forma parte.

Sobre la base de la información provista por el Ministerio del Medio Ambiente, referida a los escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero incluidas en la actualización de la NDC y de otras medidas relevantes para carbono negro, se han definido tres escenarios para el período entre 2016 y 2050, a saber y según la denominación adoptada en este trabajo: políticas actuales, carbono neutralidad y carbono neutralidad +. El primer escenario se considera de referencia y supone la implementación exitosa de medidas de políticas públicas que ya se encuentran en ejecución o que probablemente lo estarán. El segundo escenario de carbono neutralidad, permite estimar el impacto de las medidas de mitigación para gases de efecto invernadero contempladas en la actualización de la NDC de Chile sobre la evolución de las emisiones de carbono negro a escala del territorio continental nacional. El tercer escenario considera dos medidas adicionales: calefacción distrital en las regiones políticas con mayor consumo de leña y normativas más estrictas para la maquinaria fuera de ruta. Estas últimas medidas enfatizan la heterogeneidad espacial y temporal de las emisiones de carbono negro y de sus impactos, y permiten abordar la pobreza energética y la inequidad ambiental. También llaman a la necesaria coordinación e integración de las políticas climáticas y de calidad de aire.

La Tabla 5 resume el resultado de considerar los escenarios antes definidos. En suma, el escenario de carbono neutralidad diseñado para mitigar gases de efecto invernadero resulta en una disminución sustantiva de carbono negro. En efecto, en este trabajo se ha extendido el impacto de los escenarios de mitigación a otras trazas incluyendo material particulado completamente respirable –y sus fracciones de carbono orgánico y de carbono negro– y gases precursores de su formación como óxidos de nitrógeno, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles y dióxido de azufre. Sin embargo, por sí sólo no asegura mejoras en la mala calidad de aire experimentada por la población del centro y sur



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Escenario	Año		
	2016	2030	2050
Políticas actuales	10,1	9,9 (-2%)	13,0 (29%)
Carbono neutralidad	10,1	8,7 (-12%) (-14%)	6,3(-52%) (-38%)
Carbono neutralidad +	10,1	6,3 (-36%) (-36%)	3,2 (-75%) (-68%)

Tabla 5. Emisiones anuales de carbono negro en kton/a para los escenarios definidos en este trabajo. Entre paréntesis, y con números en azul (verde) según la nomenclatura de la figura anterior, se muestran los porcentajes de reducción respecto del escenario de políticas actuales (del año 2016).

de Chile, donde se estima que al menos un millón de hogares sufren pobreza energética e inequidad ambiental. El escenario de carbono neutralidad tampoco asegura evitar potenciales impactos climáticos regionales. Por ello se propone el escenario de carbono neutralidad +.

La inequidad ambiental y la pobreza energética se expresan en Chile de manera grave en torno al uso de leña para la calefacción en Chile central y sur. El sector residencial alcanza casi el 40% de las emisiones de carbono negro para el año base (2016) y su importancia relativa crece en el tiempo en el escenario de carbono neutralidad. Las emisiones de material particulado y sus precursores, asociados con la quema de leña, conllevan impactos adversos sobre la salud cuyos costos, recaen mayoritariamente sobre el sistema público de salud. Por lo tanto, como se ha reconocido por el Ministerio del Medio Ambiente a través de sendos planes de descontaminación en la zona centro y sur de Chile, es imperioso abordar este grave problema con premura. En este estudio, las medidas de mitigación presentes en los planes se contemplan hasta 2030 y su supresión resulta en un aumento de las emisiones residenciales, las cuales son parcialmente compensadas por medidas de eficiencia energética en el escenario de carbono neutralidad. No obstante, el crecimiento poblacional contribuye a compensar el efecto de las reducciones de consumo energético por mejores viviendas y estufas, resultando en emisiones de carbono negro de 2,6 y 2,5 kton en 2030 y 2050 respectivamente y, posiblemente en mayor exposición en ciudades más densas. Emisiones de 2,6 kton/a son alrededor de un 70% de las 3,7 kton emitidas en 2016 lo cual probablemente redundaría en un decrecimiento de la exposición, pero todavía un riesgo significativo para la población, especialmente de la más vulnerable a sus impactos. Esto llama a revisar con detalle la eficacia de las medidas ya implementadas y, posiblemente, aumentar la intensidad de estas y considerar alternativas.

Como se dijo, la reducción de emisiones derivada de la mitigación de gases de efecto invernadero, particularmente la del escenario de carbono neutralidad, puede ser significativa en cuanto a los números nacionales de carbono negro y otros contaminantes asociados. Sin embargo, como los sectores residencial y maquinaria fuera de ruta (MFR)



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

son predominantes para las emisiones de carbono negro y éstas ocurren mayormente en zonas diferentes a las fuentes predominantes de gases de efecto invernadero, la carbono neutralidad puede alcanzar un impacto limitado sobre la salud humana y el clima regional. Esto es consecuencia de las distintas escalas espaciales y temporales para los gases de efecto invernadero y forzantes asociados al material particulado y sus precursores. Por lo tanto, es fundamental considerar también medidas con foco en las urbes donde la exposición humana a contaminantes es mayor. El escenario de carbono neutralidad + aquí propuesto –contemplando calefacción distrital y normas estrictas para MFR– ilustra este punto y resulta eficaz en cuanto a las emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro y gases precursores, y deseable en un contexto de inequidad ambiental y pobreza energética. Reconocemos que la calefacción distrital es una medida transformacional que requerirá de audacia política e inversión sustantiva. Sin embargo, es ese el tipo de medidas necesarias para enfrentar el enorme costo de la contaminación atmosférica y los desafíos de la inequidad. Por otro lado, la calefacción distrital, siendo una medida tecnológica, implica considerar un cambio estructural de cómo los ciudadanos perciben la calefacción y el confort térmico. Ello, a su vez, hace necesario prestar atención no sólo a los aspectos tecnológicos, sino que a los sociales como parte fundamental de los proyectos de desarrollo e implementación.

Para evaluar los impactos sobre la salud de la población, se requiere entre otros, en nuestra opinión, de un inventario nacional de alta resolución (~1 km<sup>2</sup>), la realización y publicación de mediciones in situ y remotas, el uso herramientas de modelación de la dispersión de material particulado, incluyendo carbono negro y precursores, así como estudios epidemiológicos que permitan contextualizar los supuestos de las herramientas de evaluación de impactos. La combinación de estas herramientas permitirá un seguimiento más acucioso de la eficacia y eficiencia de las medidas de mitigación, así como ponderar mejor los escenarios y estrategias. En este contexto, resulta crucial caracterizar mejor, en general, los factores de emisión y, en particular, para la quema de leña en condiciones de operación real en Chile. Los factores de emisión de material particulado completamente respirable por quema de leña varían en dos órdenes de magnitud entre los documentos que sustentan instrumentos de gestión ambiental y políticas públicas, no siendo todos refrendados en estudios con revisión por pares. En este trabajo se adoptó un valor extraído de la literatura científica consistente con los inventarios previos informados por Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.

Este trabajo ha permitido actualizar inventarios previos de carbono negro y se ha ilustrado su distribución espacial heterogénea y el alcance regional de sus impactos. También se han incluido estimaciones preliminares para los sectores: aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta de potencia, tanto inferior como superior a 560 kW, siendo



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

todos potencialmente relevantes por sus impactos sobre la salud o el clima regional. Por ejemplo, la estimación preliminar de las emisiones de carbono negro de maquinaria fuera de ruta de potencia superior a 560 kW indica una participación equivalente a la mitad de las emisiones de MFR (con potencias inferiores a 560kW) las que corresponden a un tercio de las emisiones nacionales de carbono negro para 2016. Por su parte, los sectores aéreo y marítimo incrementarían las emisiones nacionales de carbono negro en casi un 30% y de dióxido de carbono equivalente en aproximadamente un 5% para condiciones presentes (2016) y mucho más a futuro. Empero, ninguno de ellos ha sido incluido en los escenarios de mitigación presentados aquí pues no forman parte del paquete de medidas contemplados en la actualización de la NDC, y una caracterización detallada de dichos sectores requeriría de la recolección y análisis de información que excede el alcance de este estudio. Aquí, es pertinente recalcar las emisiones de carbono negro de maquinaria fuera de ruta con potencia menor a 560 kW. **Considerando que alrededor de un 40% de ellas ocurre en urbes en actividades asociadas con la construcción,** para los fines de evitar impactos adversos para la salud, parece evidente que será necesario regular estas emisiones y mejorar sustantivamente la caracterización de los niveles de actividad. Entonces, se recomienda acelerar los procesos técnicos y administrativos orientados a cuantificar las emisiones y los impactos de maquinaria fuera de ruta en un espectro amplio de potencias y regularlos. Algo similar ocurre con los sectores marítimo y aéreo que son relevantes tanto en la discusión climática como en la de calidad de aire.



Por último, este estudio provee sugerencias para implementar, a través de la extensión o modificación de iniciativas existentes, un sistema de medición, reporte y verificación (MRV). Es importante destacar que, adicionalmente al seguimiento de actos administrativos, construcción y manutención de inventarios de emisiones y revisión regular de listados de medidas, se hace necesario aumentar la medición de trazas, dando cuenta de los impactos regionales del carbono negro. La buena implementación de sistemas de MRV, así como el seguimiento de los compromisos de Chile ante el Acuerdo de París y de los instrumentos nacionales de gestión ambiental, requiere en el caso del carbono negro y otros forzantes de vida media corta, particularmente ozono y metano y sus precursores, requerirá de una coordinación estrecha con las autoridades responsables de los planes de prevención y descontaminación de la calidad del aire, de desarrollo urbano (vivienda, transporte, etc.), de energía y, ciertamente, de quienes hacen el seguimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como de los responsables de la acción climática. Así, se hará necesario, por ejemplo, contar con planes de descontaminación que consideren en su concepción cobeneficios climáticos, y planes de mitigación y adaptación climática que den cuenta de sus impactos sobre la calidad del aire. Es posible que esto requiera de modificaciones legales en tanto los planes de descontaminación se aplican a determinadas zonas, según se constate la excedencia de normas de calidad, y la adopción Acuerdo de Paris en Chile



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

no define los mecanismos para conseguir las metas y aplicar medidas de mitigación específicas. La discusión de la Ley de Cambio Climático puede abrir una oportunidad para abordar esta materia. Ahora, adicionalmente al seguimiento de actos administrativos, la construcción y manutención de inventarios de emisiones y revisión regular de listados de medidas, se hace necesario aumentar la medición de las trazas de interés, estén o no normadas. En el caso de las zonas urbanas de Chile, debiera contarse, al menos, con monitores ópticos de carbono negro, tales como aetalómetros o espectrómetros de absorción multiángulo en, al menos, una estación de cada red de monitoreo urbana. Ello sería complementario a la caracterización de composición idealmente segregada por tamaño de aerosoles completamente respirables. Todo esto podría ser apoyado y retroalimentado por iniciativas académicas a través del recientemente creado Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

El compromiso de Chile de acelerar la acción climática, tal como evidencia la ciencia, hace imprescindible mitigar los forzantes climáticos de vida media corta, particularmente metano y carbono negro, al mismo tiempo que conseguir emisiones globales netas nulas de dióxido de carbono hacia 2050. La actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada va en línea con ese compromiso, pero requiere abordar con celeridad la regionalización de tales compromisos y focalizar acciones en las ciudades. En efecto, las zonas urbanas constituyen el escenario donde transformaciones profundas y principales deben ocurrir para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos del Acuerdo de París. Este estudio es un primer paso en esa dirección.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

### REFERENCIAS

- Acuto, M.: Give cities a seat at the top table, *Nature*, 537(7622), 611–613, doi:10.1038/537611a, 2016.
- Alexander, D. T. L., Crozier, P. A. y Anderson, J. R.: Brown Carbon Spheres in East Asian Outflow and Their Optical Properties, *Science* (80-. ), 321(5890), 833 LP – 836, doi:10.1126/science.1155296, 2008.
- Alvarado, M. J., McVey, A. E., Hegarty, J. D., Cross, E. S., Hasenkopf, C. A., Lynch, R., Kennelly, E. J., Onasch, T. B., Awe, Y., Sanchez-Triana, E. y Kleiman, G.: Evaluating the use of satellite observations to supplement ground-level air quality data in selected cities in low- and middle-income countries, *Atmos. Environ.*, 218, 117016, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117016, 2019.
- Amigo-Jorquera, C.: Cultura y vulnerabilidad energética territorial : el problema de la contaminación en Coyhaique, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile. [en línea] Available from: <https://massfacso.files.wordpress.com/2020/01/amigo-catalina-tesis-mass-2019.pdf>, 2019.
- Andreae, M. O. y Gelencsér, A.: Black carbon or brown carbon? the nature of light-absorbing carbonaceous aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 6(10), 3131–3148, doi:10.5194/acp-6-3131-2006, 2006.
- Anenberg, S. C., Horowitz, L. W., Tong, D. Q. y West, J. J.: An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling, *Environ. Health Perspect.*, 118(9), 1189–1195, doi:10.1289/ehp.0901220, 2010.
- Anenberg, S. C., Belova, A., Brandt, J., Fann, N., Greco, S., Guttikunda, S., Heroux, M. E., Hurley, F., Krzyzanowski, M., Medina, S., Miller, B., Pandey, K., Roos, J. y Van Dingenen, R.: Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools, *Risk Anal.*, 36(9), 1718–1736, doi:10.1111/risa.12540, 2016.
- Anenberg, S. C., Achakulwisut, P., Brauer, M., Moran, D., Apte, J. S. y Henze, D. K.: Particulate matter-attributable mortality and relationships with carbon dioxide in 250 urban areas worldwide, *Sci. Rep.*, 9(1), 11552, doi:10.1038/s41598-019-48057-9, 2019.
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A. M. y Gallardo, L.: Temporal evolution of main ambient PM<sub>2.5</sub> sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012, *Atmos. Chem. Phys.*, 17(16), 10093–10107, doi:10.5194/acp-17-10093-2017, 2017.
- Billi, M., Amigo, C., Calvo, R. y Urquiza, A.: Economía de la Pobreza Energética ¿Por qué y cómo garantizar un acceso universal y equitativo a la energía?, *Econ. y Política*, 5(2), 35–65, doi:10.15691/07194714.2018.006, 2018.
- Blakey, S., Rye, L. y Wilson, C. W.: Aviation gas turbine alternative fuels: A review, *Proc. Combust. Inst.*, 33(2), 2863–2885, doi:<https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.09.011>, 2011.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G. y Zender, C. S.: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(11), 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013.
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S. K., Sherwood, S., Stevens, B. y Zhang, X. Y.: Clouds and aerosols, en *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth*



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, vol. 9781107057, editado por Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 571–658, Cambridge University Press, Cambridge., 2013.

CCAC y UNEP: Short-lived Climate Pollutants Short-lived Climate Pollutants in Latin America, United Nations, Environmental Programme, Nairobi., 2018.

Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Antony Chen, L. W. y Motallebi, N.: PM2.5 source profiles for black and organic carbon emission inventories, *Atmos. Environ.*, 45(31), 5407–5414, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.011, 2011.

Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C. y Coheur, P.-F.: Industrial and agricultural ammonia point sources exposed, *Nature*, 564(7734), 99–103, doi:10.1038/s41586-018-0747-1, 2018.

van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C. y Villeneuve, P. J.: Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application, *Environ. Health Perspect.*, 118(6), 847–855, doi:10.1289/ehp.0901623, 2010.

EBP: Energía distrital: manual de desarrollo de proyectos. [en línea] Available from: <http://4echile.cl/agencia-sostenibilidad-publica-manual-desarrollo-energia-distrital/>, 2018.

Emodi, N. V., Emodi, C. C., Murthy, G. P. y Emodi, A. S. A.: Energy policy for low carbon development in Nigeria: A LEAP model application, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 68, 247–261, doi:10.1016/j.rser.2016.09.118, 2017.

Fariás, L., K., U., Aguirre, C., L. Bedriñana, R. C., Delgado, V., Fernández, C., Fernández, M., Gaxiola, A., González, H., Hucke-Gaete, R., Marquet, P., Vivian Montecino, C. M., Narváez, D., Osses, M., Peceño, B., Quiroga, E., Ramajo, L., Sepúlveda, H. y Valencia, J.: Nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional de Chile. Comité científico COP25, mesa Océanos. [en línea] Available from: <http://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-oceanos/16.Oceanos-Nueve-soluciones-para-las-NDC.pdf>, 2019.

GEASUR: Analisis técnico económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país. [en línea] Available from: [http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/14.\\_Antecedentes\\_economicos.pdf](http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/14._Antecedentes_economicos.pdf), 2014.

Grande-Acosta, G. y Islas-Samperio, J.: Towards a low-carbon electric power system in Mexico, *Environ. Sustain. Dev.*, 37, 99–109, doi:10.1016/j.esd.2017.02.001, 2017.

Grandin, J., Haarstad, H., Kjærås, K. y Bouzarovski, S.: The politics of rapid urban transformation, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 31, 16–22, doi:10.1016/j.cosust.2017.12.002, 2018.

GreenlabUC: Apoyo a la Iniciativa para el Plan de Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta en Chile. Estudio en desarrollo para el Ministerio de Medio Ambiente. [en línea] Available from: [http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8d935644-c283-4256-803e-38a8ad1948f4&fname=Apoyo+a+la+Iniciativa+para+el+Plan+de+Mitigación+de+los+Contaminantes+Climáticos+de+Vida+Corta+\(CCVC\)+en+Chile.pdf&access=public](http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8d935644-c283-4256-803e-38a8ad1948f4&fname=Apoyo+a+la+Iniciativa+para+el+Plan+de+Mitigación+de+los+Contaminantes+Climáticos+de+Vida+Corta+(CCVC)+en+Chile.pdf&access=public), 2016.

Gustafsson, Ö. y Ramanathan, V.: Convergence on climate warming by black carbon aerosols, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113(16), 4243 LP – 4245, doi:10.1073/pnas.1603570113, 2016.

Haines, A. y Ebi, K.: The imperative for climate action to protect health, *N. Engl. J. Med.*, 380(3), 263–273, doi:10.1056/NEJMra1807873, 2019.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Haines, A., Amann, M., Borgford-Parnell, N., Leonard, S., Kuylensstierna, J. y Shindell, D.: Short-lived climate pollutant mitigation and the Sustainable Development Goals, *Nat. Clim. Chang.*, 7(12), 863–869, doi:10.1038/s41558-017-0012-x, 2017.

Hasenkopf, C. A.: To combat air inequality, governments and researchers must open their data, *Clean Air J.*, 26(2), 8–10, doi:10.17159/2410-972X/2016/v26n2a5, 2016.

Henze, D. K., Hakami, A. y Seinfeld, J. H.: Development of the adjoint of GEOS-Chem, *Atmos. Chem. Phys.*, 7(9), 2413–2433, doi:10.5194/acp-7-2413-2007, 2007.

Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R. J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J. I., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O'Rourke, P. R. y Zhang, Q.: Historical (1750-2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS), *Geosci. Model Dev.*, 11(1), 369–408, doi:10.5194/gmd-11-369-2018, 2018.

Hong, S., Chung, Y., Kim, J. y Chun, D.: Analysis on the level of contribution to the national greenhouse gas reduction target in Korean transportation sector using LEAP model, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 60, 549–559, doi:10.1016/j.rser.2015.12.164, 2016.

Hu, G., Ma, X. y Ji, J.: Scenarios and policies for sustainable urban energy development based on LEAP model – A case study of a postindustrial city: Shenzhen China, *Appl. Energy*, 238, 876–886, doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.162, 2019.

Hutyra, L. R., Duren, R., Gurney, K. R., Grimm, N., Kort, E. A., Larson, E. y Shrestha, G.: Urbanization and the carbon cycle: Current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective, *Earth's Futur.*, 2(10), 473–495, doi:10.1002/2014ef000255, 2014.

Johansson, L., Jalkanen, J.-P. y Kukkonen, J.: Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, *Atmos. Environ.*, 167, 403–415, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042>, 2017.

Kirrane, E. F., Luben, T. J., Benson, A., Owens, E. O., Sacks, J. D., Dutton, S. J., Madden, M. y Nichols, J. L.: A systematic review of cardiovascular responses associated with ambient black carbon and fine particulate matter, *Environ. Int.*, 127, 305–316, doi:10.1016/j.envint.2019.02.027, 2019.

Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J. y Schöpp, W.: Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon, *Atmos. Chem. Phys.*, 17(14), 8681–8723, doi:10.5194/acp-17-8681-2017, 2017.

Krellenberg, K., Welz, J., Link, F. y Barth, K.: Urban vulnerability and the contribution of socio-environmental fragmentation, *Prog. Hum. Geogr.*, 41(4), 408–431, doi:10.1177/0309132516645959, 2017.

Lacey, F. y Henze, D.: Global climate impacts of country-level primary carbonaceous aerosol from solid-fuel cookstove emissions, *Environ. Res. Lett.*, 10(11), doi:10.1088/1748-9326/10/11/114003, 2015.

Lamb, W. F., Creutzig, F., Callaghan, M. W. y Minx, J. C.: Learning about urban climate solutions from case studies, *Nat. Clim. Chang.*, 9(4), 279–287, doi:10.1038/s41558-019-0440-x, 2019.

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D. y Pozzer, A.: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, *Nature*, 525(7569), 367–371, doi:10.1038/nature15371, 2015.

Li, M., Zhang, D., Li, C. T., Mulvaney, K. M., Selin, N. E. y Karplus, V. J.: Air quality co-benefits of carbon pricing in China, *Nat. Clim. Chang.*, 8(5), 398–403, doi:10.1038/s41558-018-0139-4, 2018.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Lund, M. T., Aamaas, B., Berntsen, T., Bock, L., Burkhardt, U., Fuglestvedt, J. S. y Shine, K. P.: Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation, *Earth Syst. Dyn.*, 8(3), 547–563, doi:10.5194/esd-8-547-2017, 2017.

Mallet, M., Dulac, F., Formenti, P., Nabat, P., Sciare, et al: Overview of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment/Aerosol Direct Radiative Forcing on the Mediterranean Climate (ChArMEx/ADRIMED) summer 2013 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(2), 455–504, doi:10.5194/acp-16-455-2016, 2016.

Markandya, A., Sampedro, J., Smith, S. J., Van Dingenen, R., Pizarro-Irizar, C., Arto, I. y González-Eguino, M.: Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: a modelling study, *Lancet Planet. Heal.*, 2(3), e126–e133, doi:10.1016/S2542-5196(18)30029-9, 2018.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. ., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield, T.: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to.* [en línea] Available from: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>, 2018.

Melamed, M. L., Schmale, J. y von Schneidmesser, E.: Sustainable policy—key considerations for air quality and climate change, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 23, 85–91, doi:10.1016/j.cosust.2016.12.003, 2016.

Mena-Carrasco, M., Saide, P., Delgado, R., Hernandez, P., Spak, S., Molina, L., Carmichael, G. y Jiang, X.: Regional climate feedbacks in Central Chile and their effect on air quality episodes and meteorology, *Urban Clim.*, 10(P5), 771–781, doi:10.1016/j.uclim.2014.06.006, 2014.

Ménégoz, M., Krinner, G., Balkanski, Y., Boucher, O., Cozic, A., Lim, S., Ginot, P., Laj, P., Gallée, H., Wagnon, P., Marinoni, A. y Jacobi, H. W.: Snow cover sensitivity to black carbon deposition in the Himalayas: From atmospheric and ice core measurements to regional climate simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 14(8), 4237–4249, doi:10.5194/acp-14-4237-2014, 2014.

Mitchell, L. E., Lin, J. C., Bowling, D. R., Pataki, D. E., Strong, C., Schauer, A. J., Bares, R., Bush, S. E., Stephens, B. B., Mendoza, D., Mallia, D., Holland, L., Gurney, K. R. y Ehleringer, J. R.: Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 115(12), 2912–2917, doi:10.1073/pnas.1702393115, 2018.

MMA: Planes de Descontaminación Atmosférica. Estrategia 2014-2018. [en línea] Available from: <http://airechile.mma.gob.cl/download/Plan-Descontaminacion-Atmosferica-2014-2018.pdf>, 2014.

MMA: Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente, Santiago, Chile. [en línea] Available from: <http://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/REMA-2017.pdf>, 2017.

MMA: Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático 2018. [en línea] Available from: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf>, 2018.

Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor-Córdova, M., Bórquez, R., Casassa, G., Cereceda-Balic, F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneeus, N., Lambert, F., McCarty, J. L., Mc Phee, J., Mena-Carrasco, M., Raga, G. B., Schmitt, C. y Schwarz, J. P.: Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere, *Earth's Futur.*, 3(12), 345–369, doi:10.1002/2015EF000311, 2015.

Nangini, C., Peregón, A., Ciais, P., Weddige, U., Vogel, F., Wang, J., Bréon, F. M., Bachra, S., Wang, Y., Gurney, K., Yamagata, Y., Appleby, K., Telahoun, S., Canadell, J. G., Grüber, A., Dhakal, S. y Creutzig, F.:



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

A global dataset of co2 emissions and ancillary data related to emissions for 343 cities, Sci. Data, 6, 180280, doi:10.1038/sdata.2018.280, 2019.

NDC: Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile, Primera actualización. [en línea] Available from: [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/10/Propuesta\\_actualizacion\\_NDC\\_Chile\\_2019.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/10/Propuesta_actualizacion_NDC_Chile_2019.pdf), 2019.

Nichols, J. L., Owens, E. O., Dutton, S. J. y Luben, T. J.: Systematic review of the effects of black carbon on cardiovascular disease among individuals with pre-existing disease, Int. J. Public Health, 58(5), 707–724, doi:10.1007/s00038-013-0492-z, 2013.

Padilla-Barrera, Z., Torres-Jardón, R., Gerardo Ruiz-Suarez, L., Castro, T., Peralta, O., Saavedra, M. I., Maser, O., Tan Molina, L. y Zavala, M.: Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico, Energy Sustain. Dev., 50, 61–68, doi:10.1016/j.esd.2019.02.004, 2019.

Palma Behnke, R., Barría, C., Basoa, K., Benavente, D., Benavides, C., Campos, B., Maza, N. de la, Fariás, L., Gallardo, L., García, M. J., Gonzales, L. E., Carrasco, Guarda, F., Guzmán, R., Jofré, A., Mager, J., Martínez, R., Montedónico, M., Morán, L., Muñoz, L., Osses, M., Pica, A., Rojas, M., Rudnick, A., Martín, J. P. S., Santander, A., Silva, C., Tolvett, S., Torres, R., Urquiza, A., Valdivia, P. y Vicuña, S.: Chilean NDC Mitigation Proposal: Methodological Approach and Supporting Ambition. Mitigation and Energy Working Group Report., Santiago de Chile. [en línea] Available from: <http://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-mitigacion-y-energia/14.Mitigation-NDC-White-Paper.pdf>, 2019.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Irving, W. y Krug, T.: 2006 IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [en línea] Available from: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2006.

Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A. y Zhang, X. Y.: Recommendations for reporting black carbon measurements, Atmos. Chem. Phys., 13(16), 8365–8379, doi:10.5194/acp-13-8365-2013, 2013.

Pichler, P. P., Zwickel, T., Chavez, A., Kretschmer, T., Seddon, J. y Weisz, H.: Reducing Urban Greenhouse Gas Footprints, Sci. Rep., 7(1), 14659, doi:10.1038/s41598-017-15303-x, 2017.

Romieu, I., Gouveia, N., Cifuentes, L. A., de Leon, A. P., Junger, W., Vera, J., Strappa, V., Hurtado-Díaz, M., Miranda-Soberanis, V., Rojas-Bracho, L., Carbajal-Arroyo, L., Tzintzun-Cervantes, G. y HEI Health Review Committee: Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study), Res. Rep. Health. Eff. Inst., (171), 5–86 [en línea] Available from: <http://europepmc.org/abstract/MED/23311234>, 2012.

Rowe, P. M., Cordero, R. R., Warren, S. G., Stewart, E., Doherty, S. J., Pankow, A., Schrempf, M., Casassa, G., Carrasco, J., Pizarro, J., MacDonell, S., Damiani, A., Lambert, F., Rondanelli, R., Huneus, N., Fernandez, F. y Neshyba, S.: Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes, Sci. Rep., 9(1), 4008, doi:10.1038/s41598-019-39312-0, 2019.

Schueftan, A., Sommerhoff, J. y González, A. D.: Firewood demand and energy policy in south-central Chile, Energy Sustain. Dev., 33, 26–35, doi:10.1016/j.esd.2016.04.004, 2016.

SECTRA: Sector Transporte (STEP). Secretaría de Planificación de Transportes, Santiago. [en línea] Available from: <http://www.sectra.gob.cl/biblioteca/detalle1.asp?mfn=3236>, 2014.



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Shaddick, G., Thomas, M. L., Amini, H., Broday, D., Cohen, A., Frostad, J., Green, A., Gumy, S., Liu, Y., Martin, R. V., Pruss-Ustun, A., Simpson, D., Van Donkelaar, A. y Brauer, M.: Data Integration for the Assessment of Population Exposure to Ambient Air Pollution for Global Burden of Disease Assessment, *Environ. Sci. Technol.*, 52(16), 9069–9078, doi:10.1021/acs.est.8b02864, 2018.

Shindell, D., Borgford-Parnell, N., Brauer, M., Haines, A., Kuylentierna, J. C. I., Leonard, S. A., Ramanathan, V., Ravishankara, A., Amann, M. y Srivastava, L.: A climate policy pathway for near- and long-term benefits, *Science* (80-. ), 356(6337), 493–494, doi:10.1126/science.aak9521, 2017.

Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J. F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Faluvegi, G., Folberth, G. A., Horowitz, L. W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S. T., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Doherty, R. M., Josse, B., MacKenzie, I. A., Stevenson, D. S. y Zeng, G.: Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change, *Nat. Clim. Chang.*, 7(9), 647–651, doi:10.1038/nclimate3354, 2017.

Smith, J. J. y Ahmad, M. T.: Globalization's Vehicle: The Evolution and Future of Emission Regulation in the icao and imo in Comparative Assessment, *Clim. Law*, 8(1–2), 70–103, doi: https://doi.org/10.1163/18786561-00801003, 2018.

Smith, P. y Henríquez, C.: Public Spaces as Climate Justice Places? Climate Quality in the City of Chillán, Chile, *Environ. Justice*, 12(4), 164–174, doi:10.1089/env.2018.0041, 2019.

Sofiev, M., Winebrake, J. J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira, J., Kouznetsov, R., Jalkanen, J. P. y Corbett, J. J.: Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs, *Nat. Commun.*, 9(1), doi:10.1038/s41467-017-02774-9, 2018.

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P. M.: Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, editado por T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, y P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.

Sun, K., Tao, L., Miller, D. J., Pan, D., Golston, L. M., Zondlo, M. A., Griffin, R. J., Wallace, H. W., Leong, Y. J., Yang, M. M., Zhang, Y., Mauzerall, D. L. y Zhu, T.: Vehicle Emissions as an Important Urban Ammonia Source in the United States and China, *Environ. Sci. Technol.*, 51(4), 2472–2481, doi:10.1021/acs.est.6b02805, 2017.

Tagle, M., Reyes, F., Vásquez, Y., Carbone, S., Saarikoski, S., Timonen, H., Gramsch, E. y Oyola, P.: Spatiotemporal Variation in Composition of Submicron Particles in Santiago Metropolitan Region, Chile, *Front. Environ. Sci.*, 6, doi:10.3389/fenvs.2018.00027, 2018.

Toro, R. A., Canales, M., Flocchini, R. G., Morales, R. G. E. y Leiva G., M. A.: Urban Atmospheric Ammonia in Santiago City, Chile, *Aerosol Air Qual. Res.*, 14(1), 33–44, doi:10.4209/aaqr.2012.07.0189, 2014.

UNEP y WMO: Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. Summary for Decision Makers. [en línea] Available from: [http://www.unep.org/publications/contents/pub\\_details\\_search.asp?ID=6201](http://www.unep.org/publications/contents/pub_details_search.asp?ID=6201), 2011.

Vandyck, T., Keramidis, K., Kitous, A., Spadaro, J. V., Van Dingenen, R., Holland, M. y Saveyn, B.: Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges, *Nat. Commun.*, 9(1), 4939, doi:10.1038/s41467-018-06885-9, 2018.

WRI: MRV 101: Understanding Measurement, Reporting, and Verification of Climate Change



## Mitigación de carbono negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile

Mitigation. [en línea] Available from: [https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/MRV\\_101\\_0.pdf](https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/MRV_101_0.pdf), 2016.

Xie, Y., Dai, H., Xu, X., Fujimori, S., Hasegawa, T., Yi, K., Masui, T. y Kurata, G.: Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries, *Environ. Int.*, 119, 309–318, doi:10.1016/j.envint.2018.07.008, 2018.

Yan, J., Wang, X., Gong, P., Wang, C. y Cong, Z.: Review of brown carbon aerosols: Recent progress and perspectives, *Sci. Total Environ.*, 634, 1475–1485, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.083, 2018.



Mitigación de carbono negro  
en la actualización de la  
contribución nacionalmente  
determinada de Chile

---

**Resumen para  
tomadores de decisión**