

INFORME A LAS NACIONES

El aire que respiramos: pasado, presente y futuro

Contaminación atmosférica por
MP_{2,5} en el centro y sur de Chile

(CR)² | Center for Climate
and Resilience Research
www.CR2.cl



UNIVERSIDAD
DE CHILE

PATROCINA



UNIVERSIDAD
DE CONCEPCIÓN

INSTITUCIONES ASOCIADAS



UNIVERSIDAD
AUSTRAL DE CHILE



AGENCIA NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

FINANCIA



Ciudad de Temuco

INFORME A LAS NACIONES

El aire que respiramos: pasado, presente y futuro

Contaminación atmosférica por
MP_{2,5} en el centro y sur de Chile.



UNIVERSIDAD
DE CHILE

PATROCINA



UNIVERSIDAD
DE CONCEPCION

INSTITUCIONES ASOCIADAS



UNIVERSIDAD
AUSTRAL DE CHILE



AGENCIA NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

FINANCIA

	Introducción	
	El (mal) aire que aún respiramos	5
1	CAPITULO 1	
	Recuento histórico: Tránsito de contaminación a descontaminación	
	Sección 1: Contexto histórico de la polución del aire en Chile	8
	Sección 2: Periodo instrumental	11
	Sección 3: Contexto sociojurídico	14
2	CAPITULO 2	
	Causas de la contaminación atmosférica	
	Sección 1: Principales fuentes de emisión en Chile.....	18
	Sección 2: Factores meteorológicos que inciden en episodios de mala calidad de aire por material particulado en ciudades del centro y sur de Chile.....	22
	BOX: Caso Coyhaique.....	26
	BOX: Carbono negro.....	27
	BOX: Análisis de incertidumbre en las emisiones	28
3	CAPITULO 3	
	Condiciones socioculturales en la transición energética	
	Sección 1: Condiciones socioculturales del uso intensivo de leña: caso de Temuco, Valdivia y Coyhaique.....	30
	Sección 2: Barreras para la transición energética	32
4	CAPITULO 4	
	Condiciones económicas e institucionales en el uso de leña	
	Sección 1: Mercado de la leña.....	36
	Sección 2: Marco normativo del mercado de la leña	38
	Sección 3: Planes de Descontaminación Atmosférica	40
	BOX: Participación ciudadana en los PPDA y PDA	43
5	CAPITULO 5	
	Impactos de la contaminación atmosférica en la salud en un contexto de desigualdad ambiental y vulnerabilidad	
	Sección 1: Impactos en salud: Mortalidad y admisiones hospitalarias atribuibles a la contaminación por MP _{2,5}	47
	Sección 2: Contaminación atmosférica en un contexto de desigualdad ambiental.....	49
	Sección 3: La contaminación atmosférica tiene un impacto diferenciado en la población.....	52

6	CAPITULO 6	
	Impactos del cambio climático y de políticas de mitigación en la calidad del aire durante las próximas décadas	
	Sección 1: Escenarios de emisiones de contaminantes criterio para el sector residencial	58
	Sección 2: Reducción de emisiones residenciales y su impacto en la calidad del aire.....	60
	Sección 3: Cambio climático y su potencial impacto en la calidad del aire.....	64
	BOX: Pobreza energética como barrera para la transición energética.....	67
	BOX: Proyección carbono negro	68
7	CAPITULO 7	
	Contaminación y pandemia	
	Sección 1: Contaminación por MP _{2,5} y pandemia COVID-19.....	70
	Conclusiones	78
	Recomendaciones	
	Más y mejor información para la gestión de la calidad del aire	83
	Mejoras en planes de prevención y descontaminación atmosférica	85
	Superación de las barreras a la transición energética.....	86
	Impactos sobre la salud: mucho más que conteos nacionales	87
	Agradecimientos	89
	Referencias	90
Glosario	94	

Los resultados presentados en este informe son parte del trabajo interdisciplinario que realiza el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)².

El (CR)² es un centro de excelencia financiado por el programa FONDAP de CONICYT (Proyecto 15110009) en el cual participan cerca de 60 científicos asociados a la Universidad de Chile, la Universidad de Concepción y la Universidad Austral de Chile.

La versión electrónica de este documento está disponible en el sitio web www.cr2.cl/contaminacion/

Coordinación general:

Nicolás Huneus

Edición general:

Eugenia Gayó, Mauricio Osses, Anahí Urquiza, Rodrigo Arriagada, Nicolás Huneus, Macarena Valdés, José Barraza y Andrea Rudnick

Diseño:

M. Giselle Ogaz

Apoyo: Francisca Pedreros

Fotografías:

© Sergio Rigoberto Campos Valese (www.memoriasdelsigloxx.cl) - Página 7

© Roberto Montandon (www.archivomontandon.cl) - Página 8

© Colección Museo Histórico Nacional (www.memoriachilena.gob.cl) - Página 15

© Guillermo Bastías Moreno, “Guillo” (www.guillo.cl) - Ilustración página 16

© Mario Quilodrán (m.quilodrans@gmail.com) - Portadas y páginas 17, 22, 47, 52, 57, 69, 78-79, 80

© Alejandro Olivares (www.alejandroolivares.com) - Páginas 50, 53

© Carlos Riquelme - (www.flickr.com/photos/tabriss) - Páginas 34-35, 40, 41, 60

© Claudio Campusano - Páginas 24, 75, 76-77

© Catalina Amigo - Páginas 29, 31, 32, 33, 36, 38, 42, 49, 58

© Gustavo Blanco - Página 18

© Zoë Fleming - Páginas 44-45

© Shutterstock - Páginas 18, 20, 70

La presente publicación debe citarse como:

Huneus, N., Urquiza A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., Álamos, N., Amigo, C., Arrieta, D., Basoa, K., Billi, M., Blanco, G., Boisier, J.P., Calvo, R., Casielles, I., Castro, M., Chahuán, J., Christie, D., Cordero, L., Correa, V., Cortés, J., Fleming, Z., Gajardo, N., Gallardo, L., Gómez, L., Insunza, X., Iriarte, P., Labraña, J., Lambert, F., Muñoz, A., Opazo, M., O’Ryan, R., Osses, A., Plass, M., Rivas, M., Salinas, S., Santander, S., Seguel, R., Smith, P., Tolvett, S (2020). El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², (ANID/FONDAP/15110009), 102 pp. Disponible en www.cr2.cl/contaminacion/

El (mal) aire que aún respiramos

El presente informe se centra en el rol que juega el sector residencial y sus emisiones a la atmósfera de material particulado fino completamente respirable, esto es, inferior a 2,5 micrones (aproximadamente veinte veces más pequeño que un cabello humano), también conocido como MP_{2,5}. Este tipo de partículas forma parte del material particulado grueso (MP₁₀). El MP_{2,5} es el principal factor de la contaminación atmosférica en la zona centro y sur de Chile, y afecta directamente a la mayor parte de la población. El informe examina no solo la calidad del aire actual, sino que también aborda el pasado y explora factores que podrían influir en su evolución futura.

Se estima que en el año 2018 alrededor de 10 millones de personas estuvieron expuestas a concentraciones promedio diarias de MP_{2,5} superiores a lo establecido por la norma chilena actual (50 µg/m³) y aún más lejos del límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, de 25 µg/m³). Estos niveles de contaminación por MP_{2,5} tienen múltiples e importantes impactos, destacándose el efecto nocivo sobre la salud, ocasionando más de 3.600 muertes prematuras en 2018 (MMA, 2019).

Actualmente, existen trece Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), tres Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) y un Plan de Prevención Atmosférica (PPA) vigentes en Chile. De los trece PDA existentes, diez aplican para ciudades en el centro y sur del país, la mayoría de los cuales se centran en la contaminación por MP_{2,5} vinculada a la calefacción residencial basada en la quema de leña. En siete de estos diez planes queda establecido que la contribución del sector residencial representa más del 90 % de las emisiones totales anuales de MP_{2,5}.

Este consumo intensivo de leña es el resultado de la exposición a climas fríos, baja eficiencia energética en la construcción de las viviendas y precios significativamente más bajos de este combustible en comparación con otras fuentes de energía con menor impacto en la contaminación. Esto se conoce como pobreza energética y se asocia estrechamente a la inequidad socioambiental que caracteriza a Chile y sus urbes. A pesar de los esfuerzos realizados por la autoridad ambiental, a través de los PDA, el problema persiste e incluso ha empeorado en algunas ciudades.

Además de la combustión de leña, son múltiples las actividades humanas que influyen sobre los niveles de contaminación por partículas finas. En el norte del país, el sector minero y la generación eléctrica son los principales responsables de la mala calidad del aire, mientras que, en la zona central, las emisiones de los sectores transporte y residencial son las dominantes. Paralelamente, existen las llamadas zonas de sacrificio, las que se caracterizan por el emplazamiento de grandes complejos industriales cercanos a zonas pobladas con altos niveles de emisión de diversas sustancias nocivas para la salud de la población. En cuanto a las especies contaminantes, existe también el ozono (O₃) y el dióxido de azufre (SO₂), entre otros. El O₃ es un contaminante secundario (se forma en la atmósfera a partir de procesos fotoquímicos) que no solo afecta la salud, sino también los ecosistemas, la productividad agrícola y el clima. El SO₂, en tanto, es un gas regulado que se emite a la atmósfera como resultado de la combustión de petróleo y carbón o derivado de la fundición de cobre, por lo que su concentración es alta en las zonas industriales, afectando gravemente la salud de las comunidades que residen en estas zonas.

La contaminación en una ciudad no es solamente el resultado de las emisiones, sino que también de condiciones meteorológicas que, entre otros factores,

afectan la ventilación. Lo anterior implica que, en el futuro, la calidad del aire en las ciudades de Chile no dependerá solamente de las políticas de mitigación que busquen reducir las emisiones, sino que también se puede ver afectada por el cambio climático.

Los resultados presentados en este informe son fruto del esfuerzo de un equipo interdisciplinario y la combinación de múltiples y diversas herramientas, tales como modelos, trabajos en terreno, etnografías y talleres, que permitieron desarrollar información desde distintas ópticas de estudio. Con ello, se busca contribuir en la comprensión multidimensional del problema, considerando sus condiciones ambientales, económicas y socioculturales.

En primera instancia, el informe aborda la historia de la contaminación en Chile desde épocas precolombinas hasta el presente y continúa, luego, con las principales causas de la contaminación, tanto antropogénicas como naturales. Los siguientes capítulos se refieren al aspecto social de la contaminación atmosférica, desde el uso de la leña en el sur del país y las distintas barreras que impiden la transición energética hacia otras fuentes menos contaminantes hasta su impacto en la salud. El sexto capítulo del informe viene a mostrar un panorama futuro de las emisiones, dando luces de cómo la evolución de las emisiones locales y el cambio climático contribuirán a modular la calidad del aire en el futuro. Tomando en cuenta la contingencia mundial, se realizó también un análisis de la relación entre la contaminación y el COVID-19, finalizando con un capítulo de recomendaciones que contribuyan al desarrollo de medidas de descontaminación eficientes que permitan obtener un aire limpio en las ciudades del país.

Para mayor comprensión de la terminología técnica usada, se incluye un glosario al final de este informe.



CAPÍTULO 1

Recuento histórico: Tránsito de contaminación a descontaminación

Autores:
Eugenia Gayó
Damaris Arrieta
Duncan Christie
Laura Gallardo
Nicolás Huneus
Julio Labraña
Fabrice Lambert
Ariel Muñoz
Mariel Opazo
Maximiliano Rivas
Rodrigo Seguel
Anahí Urquiza

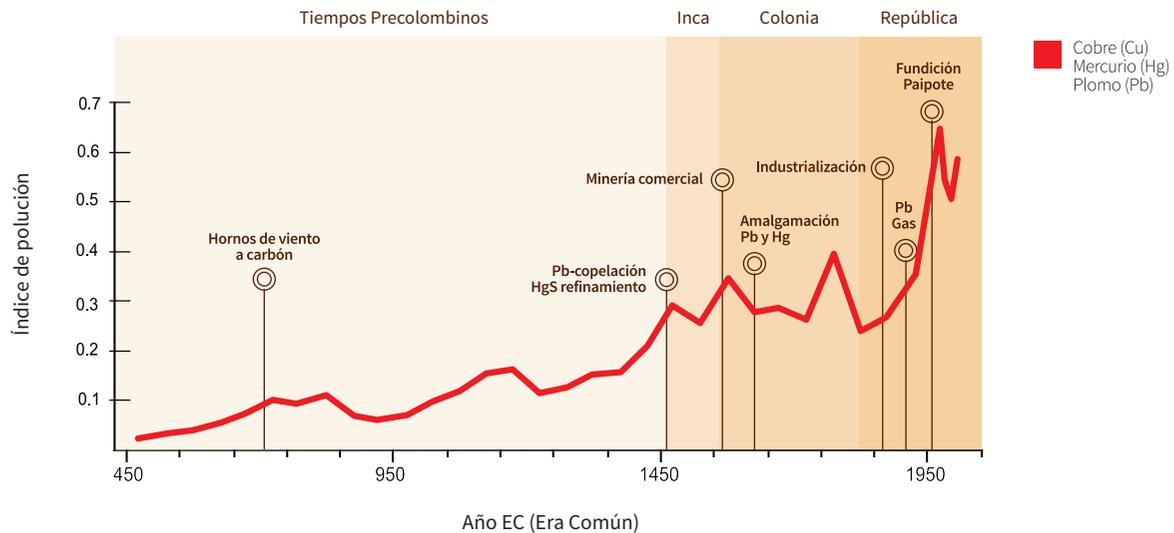
1 | Contexto histórico de la polución del aire en Chile

Reconstruir el ambiente del pasado amplía nuestra visión sobre la evolución de la contaminación atmosférica a través del tiempo, principalmente en zonas donde las redes de monitoreo son escasas y los datos disponibles abarcan lapsos temporales acotados. Para elaborar estas reconstrucciones se estudian anillos de árboles, sedimentos de lagos y testigos de hielo, los que han archivado secuencialmente los contaminantes liberados por las actividades humanas pasadas, permitiendo calcular índices de emisión de metales pesados o carbono negro.

En Chile, las reconstrucciones complementan los registros instrumentales, que rara vez se extienden más allá de la década de los 80. Gracias a ellas, ha sido posible revelar un aumento progresivo de contaminantes en el norte del país desde tiempos precolombinos (Figura 1; Gayo et al., 2019), cuyos incrementos específicos en el índice de polución se asocian a la adopción de innovaciones tecnológicas y prácticas que maximizaron las capacidades productivas, en particular, las relacionadas con la metalurgia. Por ejemplo, el aumento de este índice registrado a partir del año 700 ocurre tras la incorporación de sofisticados hornos de viento a carbón para la fundición de cobre. Algo similar se observa luego de la introducción de técnicas de refinación y recuperación para explotar las reservas regionales de plata, cobre y oro, primero por el imperio Inca (año 1450) y, luego, en la Colonia. Esto último coincide con el inicio de la minería y metalurgia comercial en el año 1533, mientras que su industrialización en 1880 dio lugar a un aumento exponencial en las emisiones, con una marcada aceleración debido a la incorporación de la gasolina con plomo, en 1920, y la apertura de la primera planta chilena de fundición de cobre a gran escala (Paipote), en el año 1952.

Fundición Paipote, 1951

Figura 1. Principales hitos sociotecnológicos y la tendencia reconstruida del índice de polución asociado a emisiones antropogénicas de cobre (Cu), mercurio (Hg) y plomo (Pb) en el norte de Chile durante el último milenio (Gayó et al., 2019).



Los registros sedimentarios de cuatro lagos de la cuenca de Santiago permitieron inferir la evolución de la calidad del aire durante los últimos dos siglos, en particular, en relación al índice de polución del carbono negro (Figura 2; von Gunten et al., 2009). En la práctica, se observa una estrecha relación entre los crecientes niveles poblacionales y de contaminación, como también con el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita. Esto implica que la calidad del aire en la región se ha visto fuertemente influenciada por la quema de combustibles fósiles y es, por tanto, el reflejo de la presión ejercida por el crecimiento socioeconómico. En efecto, cambios significativos en las tendencias a largo plazo ocurren precisamente después de la apertura de la mina El Teniente (1905), la nacionalización del cobre (1971) y el “auge minero” (1992 a 2005), proceso que involucró la construcción de megaproyectos a través de inversiones extranjeras directas.

La estrecha reciprocidad entre la contaminación del aire y los procesos socioeconómicos también se manifiesta en el complejo industrial de Ventanas (Figura 3) y el área metropolitana de Antofagasta (Figura 4). En el primer caso, tanto los registros lacustres como los de anillos de árboles muestran bajos niveles de contaminación entre los años 1920 y 1960 (Muñoz et al., 2019), pero una vez que entran en funcionamiento la refinera-fundición de cobre y la primera termoeléctrica a carbón, en el año 1964, la contaminación atmosférica se incrementa exponencialmente. Sin embargo, la disminución progresiva en los niveles desde 1997 sugiere que los planes de descontaminación han tenido un impacto positivo. En el caso de Antofagasta, los datos de árboles urbanos indican que la expansión demográfica experimentada desde la década de los 60 en adelante ha conllevado al deterioro de la calidad del aire (Figura 4).

Figura 2. Relación entre la trayectoria del índice de polución de carbono negro en Santiago desde el año 1850 (von Gunten et al., 2009), las series históricas para el PIB (Maddison Project Database, 2018) y el crecimiento poblacional regional.

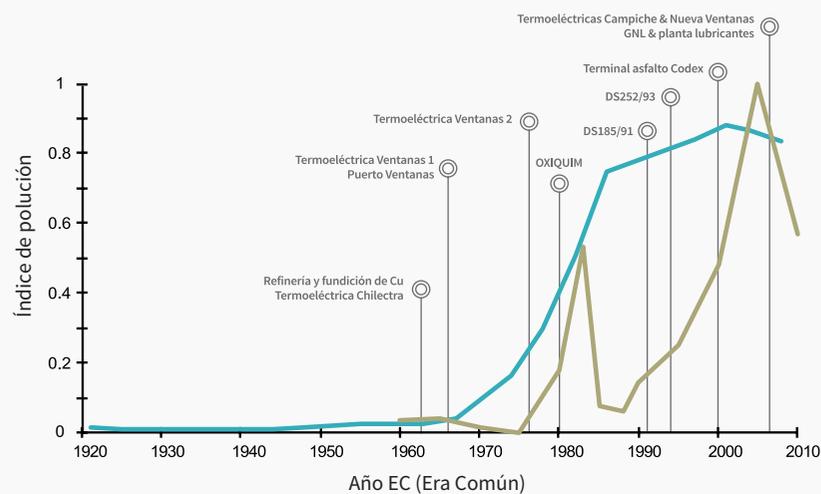
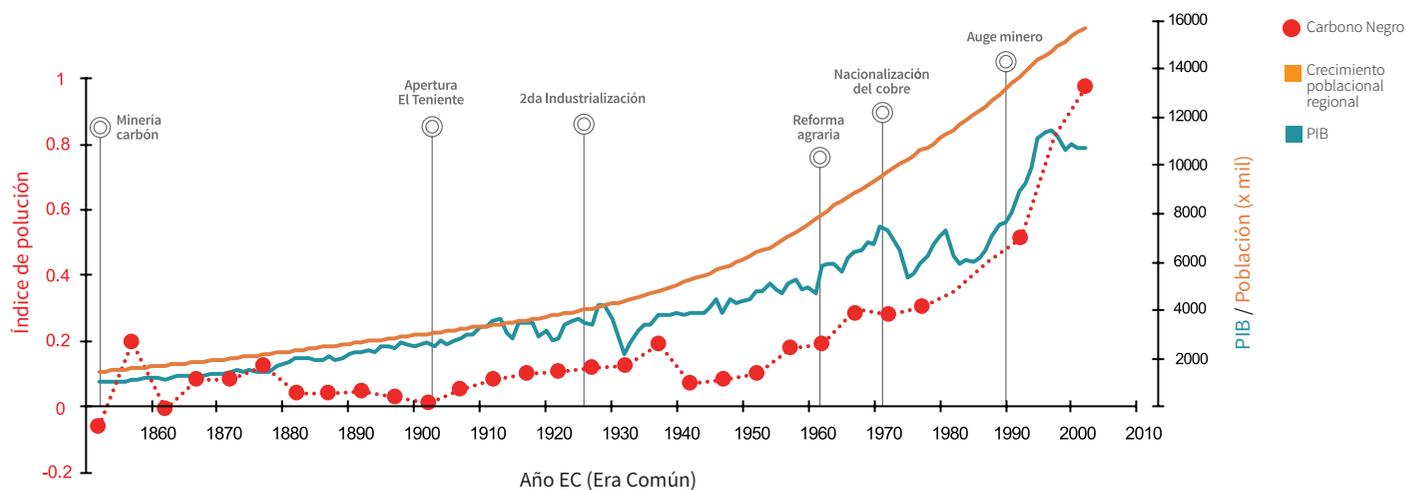
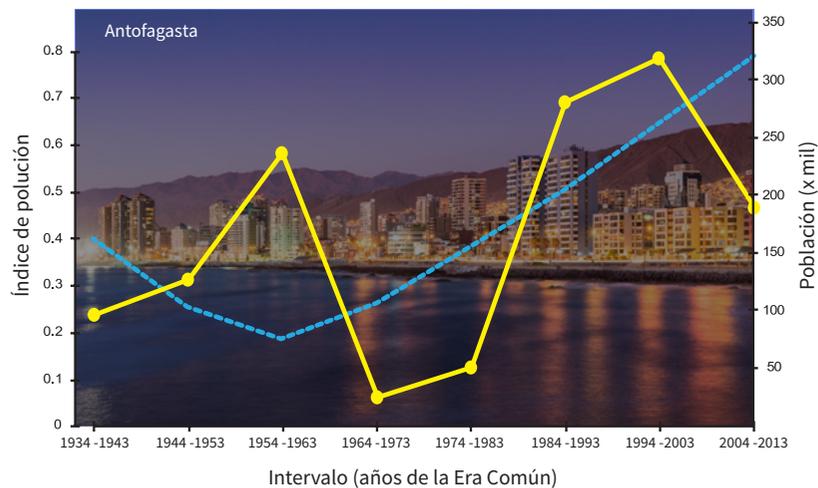


Figura 3. Índices de polución por cobre (Cu) y plomo (Pb) en el Complejo Industrial de Ventanas inferidos a partir de un registro lacustre y anillos de árboles (Muñoz et al., 2019).

Polución por Cu y Pb inferido a partir de un registro lacustre
 Polución por Cu y Pb reconstruido a través de anillos de árboles
 DS Decreto Supremo.

Figura 4. Contaminación atmosférica por metales pesados, cobre (Cu) y plomo (Pb), en Antofagasta y su relación con la expansión de la población urbana entre los años 1934 y 2011.

Expansión de la población urbana
 Polución por Cobre (Cu) y Plomo (Pb)



2 | Periodo instrumental

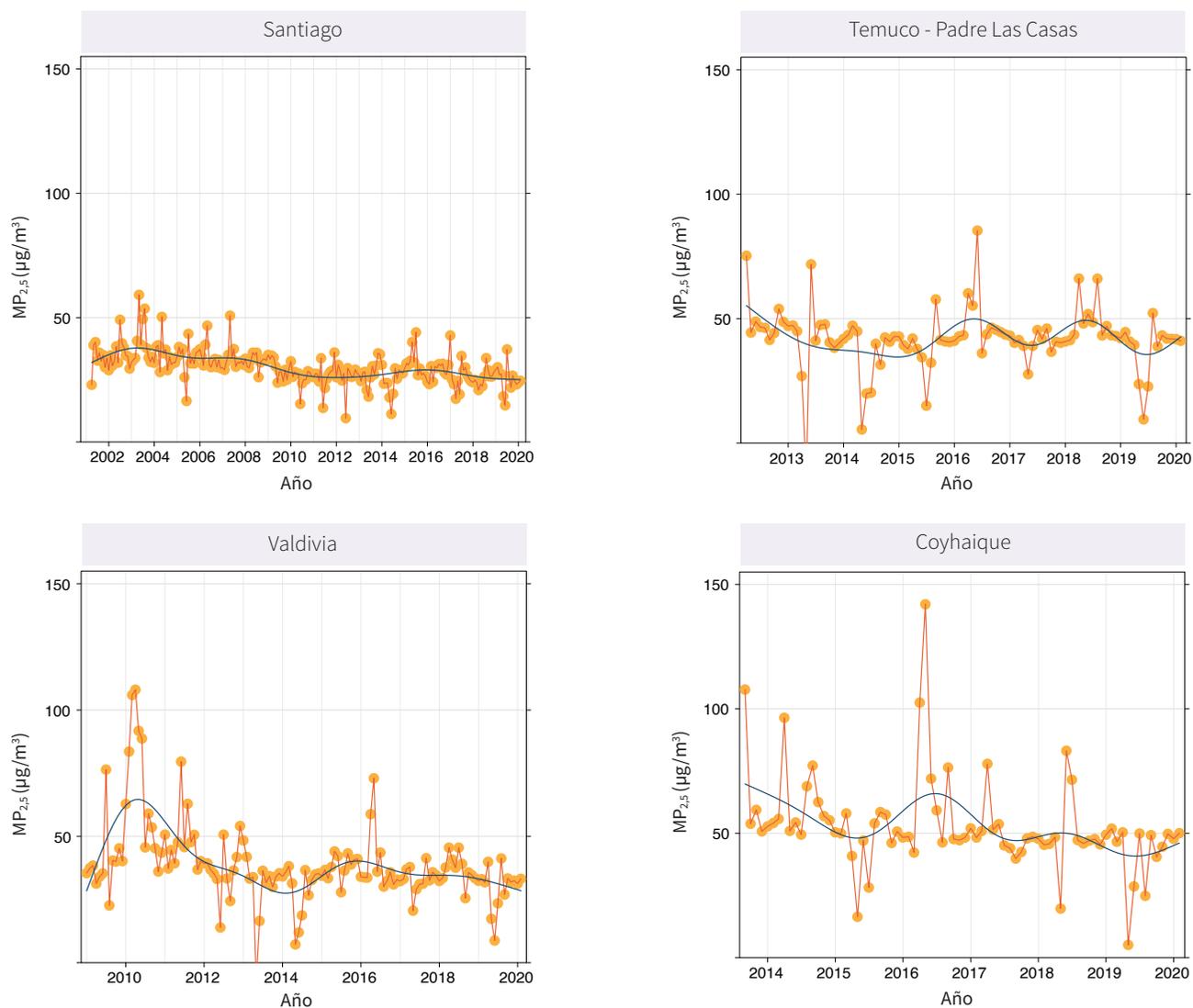
En Chile, a partir del año 1988, comienza a instalarse de forma progresiva en la Región Metropolitana un sistema de monitoreo automático de calidad de aire con representación poblacional. Dicho sistema se ha expandido paulatinamente al resto de las ciudades del país, muchas de ellas aquejadas por serios problemas de material particulado, y también a zonas industrializadas, debido a las exigencias establecidas por la legislación ambiental. Así, el periodo de mediciones no es el mismo para todas las localidades como tampoco lo es el tipo de contaminantes medidos.

De la misma manera, la evolución de la calidad del aire no ha sido la misma para todas las localidades. Por ejemplo, la estación de monitoreo de Parque O'Higgins, en el centro de Santiago, muestra una tendencia de disminución en la concentración de $MP_{2,5}$ de $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año para el periodo 2001–2011 (Figura 5), impulsada en gran medida por la disminución de la concentración durante los meses de invierno, manteniéndose relativamente constante desde el 2012 en adelante, sin una tendencia estadísticamente significativa. Por otra parte, el escenario que muestra la estación de monitoreo Padre Las Casas (Temuco) en el periodo de abril de 2012 a febrero de 2020, no evidencia una tendencia a la baja estadísticamente significativa. En tanto, la estación de monitoreo de Valdivia muestra una importante disminución a partir de los altos niveles registrados el año 2010. Sin embargo, a pesar de dicho descenso, no se observa una nueva tendencia a la baja estadísticamente significativa desde el año 2014. Por último, la estación Coyhaique II presenta una reducción en la concentración de $MP_{2,5}$ a una tasa de $1.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año entre septiembre de 2013 y febrero de 2020.



Santiago, circa 1990

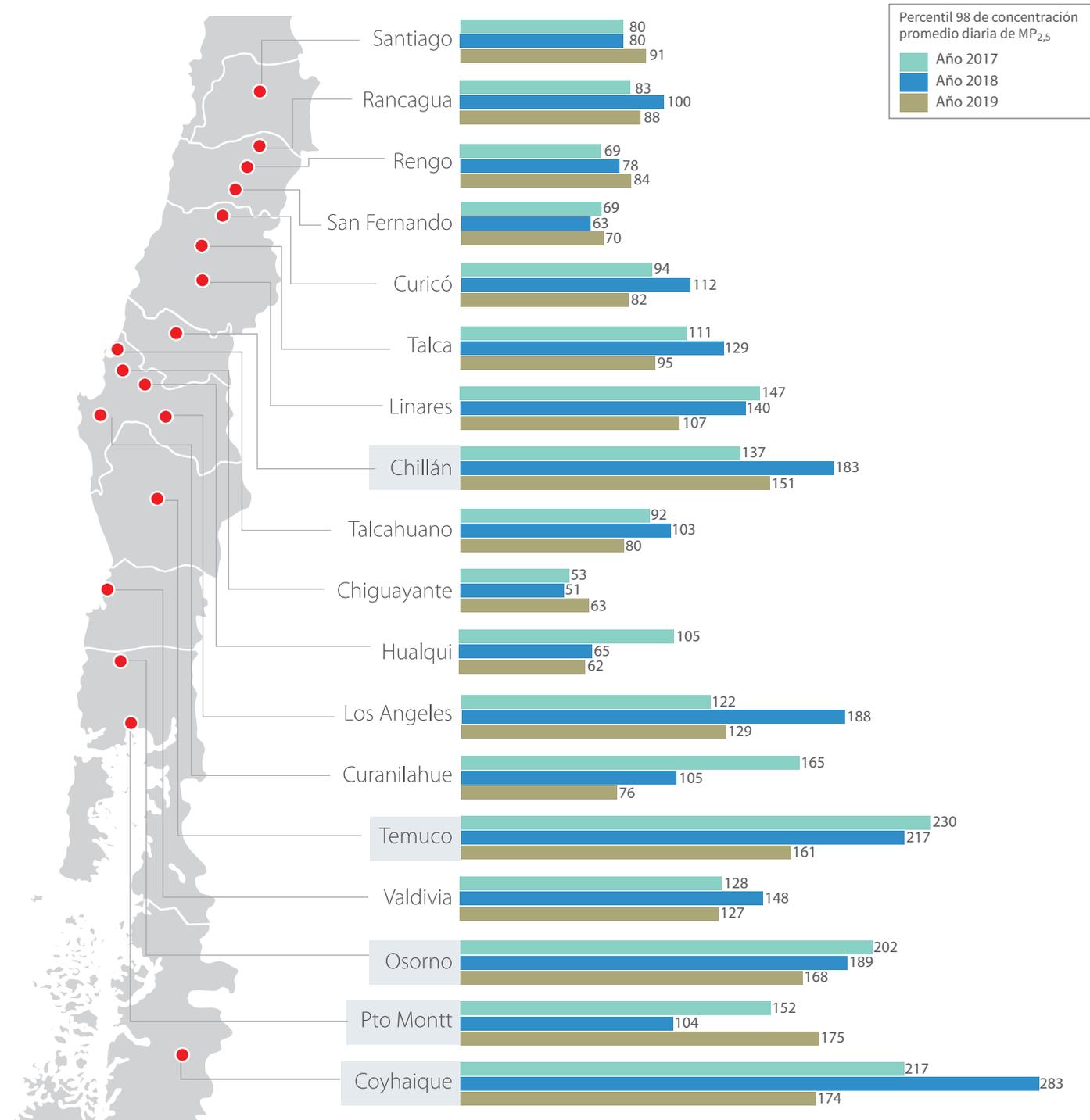
Figura 5. Promedio mensual de concentración de $MP_{2,5}$ (sin considerar la variación estacional) para las estaciones de Parque O'Higgins (Santiago), Padre Las Casas (Temuco), Valdivia (Valdivia) y Coyhaique II (Coyhaique). Datos horarios obtenidos desde el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (<https://sinca.mma.gob.cl>). Se consideraron solo los datos validados y preliminares.



En relación al cumplimiento de la norma diaria de $MP_{2,5}$, de las 22 localidades de la zona centro y sur de Chile que tienen datos para el periodo 2017-2019, 18 de ellas sobrepasan esta norma (Figura 6). Según este indicador, las cinco ciudades con peor calidad del aire son: Coyhaique, Puerto Montt, Osorno, Temuco y Chillán.

Adicionalmente, siete de las 18 localidades que exceden la norma diaria no cuentan con un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) vigente para $MP_{2,5}$, mientras que cuatro localidades que sí poseen PDA no han disminuido este indicador con respecto al año 2017.

Figura 6. Percentil 98 de concentración promedio diaria para los años 2017, 2018 y 2019. Localidades con valores mayores a $50 \mu g/m^3$ que exceden la norma diaria nacional.



3 | Contexto sociojurídico

Con la progresiva industrialización del país en los años cincuenta aumentó la preocupación por la contaminación del aire, especialmente en la Región Metropolitana (Imagen 1). Es posible identificar cinco fases de la institucionalidad estatal para abordar esta problemática:

- Reconocimiento de la gravedad del problema, lo cual fue propiciado por el análisis de médicos e ingenieros del Servicio Nacional de la Salud y la promulgación del Decreto 144 en el año 1961
- El posicionamiento público del tema mediante la discusión de especialistas en prensa sobre la insuficiencia científica y política de estas medidas.
- Fundación del Instituto de Higiene del Trabajo y Contaminación Atmosférica, que consensó una definición experta del problema.
- La creación de comisiones técnico-políticas que destacaron la incapacidad de la normativa vigente para disminuir los efectos de la polución.
- La institucionalización de un nuevo sistema de control del aire mediante la Resolución 1215, de 1978, cuyo objetivo fue vincular los roles del Estado, la investigación científica y la fiscalización (Labraña et al., 2020).

Santiago, circa 1960

Imagen 1. En esta fotografía es posible apreciar que la capa de esmog que se percibe como una bruma es un rasgo que se manifiesta en las calles de la ciudad ya desde la década de 1940. Lugar: Calle Ahumada con la Alameda, Santiago (1942)



El debate sobre la contaminación: la cuestión de la responsabilidad (1978 – 1994).

Una vez alcanzado un consenso político-científico sobre la gravedad de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana, el debate se centró en la identificación de las principales fuentes de emisiones y en la búsqueda de medidas eficaces para su reducción. La discusión se enfocó en la contribución de tres actores principales: (a) vehículos privados, (b) industrias y (c) transporte público. Este debate se dio con intensidad en la prensa de la época, imponiéndose los grupos que señalaron al transporte público como principal responsable (Imagen 2). El debate se resolvió finalmente

implementando mayores regulaciones a este último sector, a través de la Ley 18.696, de 1988, que estableció que los servicios de transporte debían contar con un certificado de revisión técnica que constatará el cumplimiento de especificaciones mínimas de emisión de gases. Esta normativa entregó al Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones la capacidad de restringir la circulación de vehículos en casos de vías congestionadas. A su vez, la resolución 369 (1988) definió índices mínimos de calidad del aire (Labraña et al., 2020).



Imagen 2. Noticia aparecida en el diario El Mercurio el 5 de junio de 1987. Fuente: Diario El Mercurio.

Una política general para la contaminación: consensos técnicos (1994 – 2019).

Con el retorno a la democracia, el diagnóstico consensuado entre actores políticos, la academia y la sociedad civil fue que las políticas privatizadoras de la dictadura agudizaron los problemas, y que el marco normativo vigente era insuficiente. Bajo este contexto se promulga la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994). Sin embargo, durante la década del 2000, la relevancia de los organismos burocráticos aumentó en desmedro de los científicos y representantes de la sociedad civil, convirtiendo esta normativa en un proceso principalmente técnico, sin considerar el contexto sociocultural. Así, la evolución de los Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA) en Santiago, entre 1998 y 2017, fue representativa de esta tendencia.

El PPDA original, de 1998, señalaba como principales responsables de la contaminación al transporte y a los sectores industriales y comerciales. En cambio, la actualización del año 2017 hizo énfasis en el sector residencial, enfatizando medidas tecnológicas sin atender la dimensión sociocultural de la contaminación. Asimismo, existen discrepancias sobre los impactos de la contaminación. Esta actualización subrayaba la productividad económica, aspecto no relevado en el PPDA original ni en las investigaciones científicas, pero sí destacado en la prensa de la época. Lo mismo ocurría en el ámbito de las soluciones. Por ejemplo, el PPDA de 1998 sugería establecer mecanismos de fiscalización a nivel ministerial, mayores exigencias de compensación e impuestos a los combustibles, mientras que su actualización destaca las ventajas de los incentivos, programas de difusión y educación ambiental, lo que contrasta con la estrategia de mayor regulación estatal propuesta desde la investigación (Urquiza et al., 2020).

¿Cuáles son las causas del Smog?



Guillo (2013), ilustración publicada en su Fanpage de Facebook



CAPÍTULO 2

Causas de la contaminación atmosférica

Autores:

Mauricio Osses
Nicolás Alamos
Kevin Basoa
Juan Pablo Boisier
Rubén Calvo
Nicolás Huneus
Luis Gómez
Raúl O'Ryan
Sebastián Tolvett

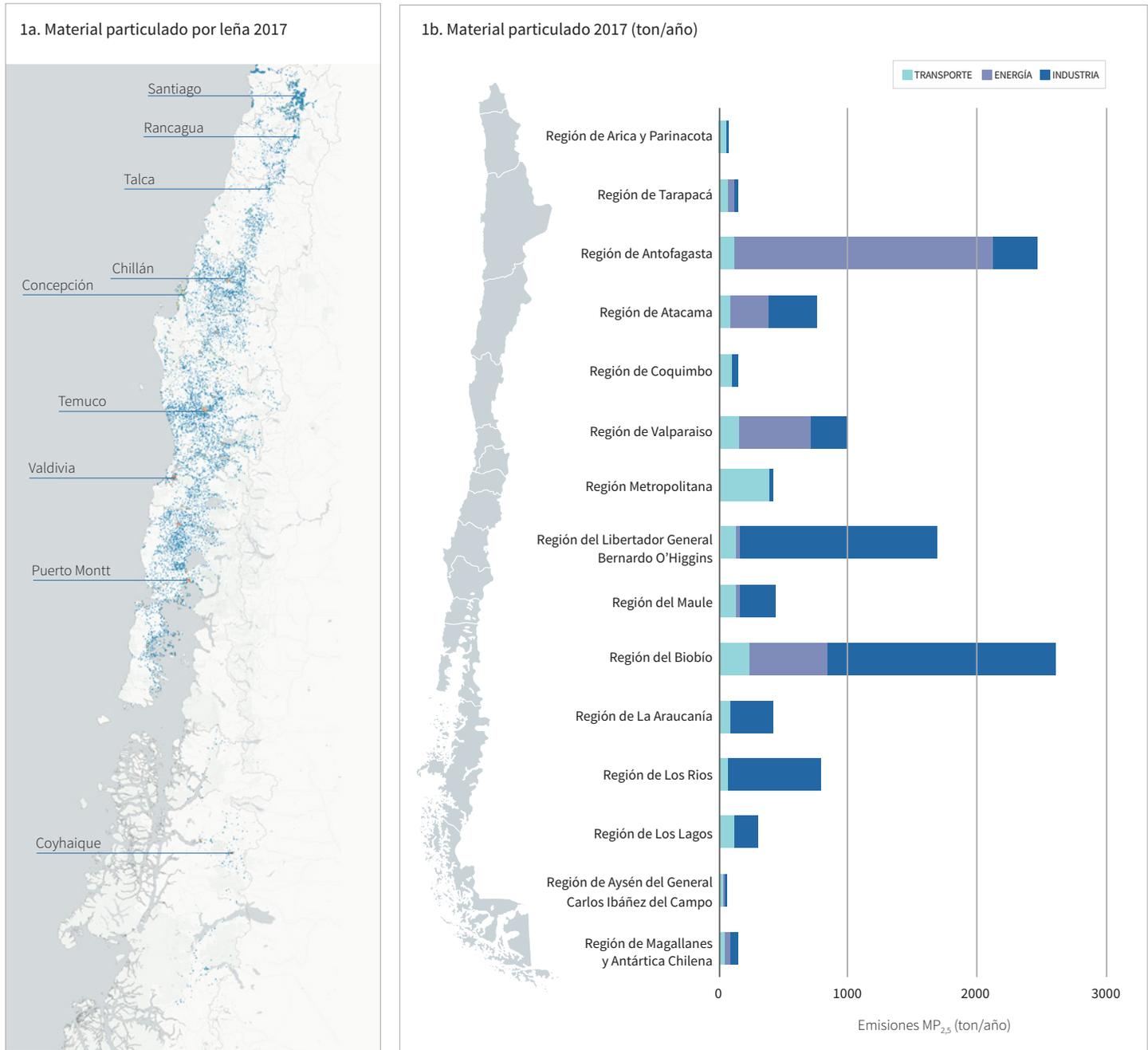
1 | Principales fuentes de emisión en Chile

Los actuales problemas de contaminación atmosférica y cambio climático están directamente relacionados con emisiones de contaminantes criterio, forzantes climáticos de vida corta y de gases de efecto invernadero (GEI). Estimar estas emisiones, de manera consistentes entre sí, es un prerequisite para cuantificar el impacto de las actividades humanas tanto en la salud como en el clima, y así desarrollar estrategias efectivas de descontaminación que permitan abordar ambos problemas de manera integrada.

Para poder cuantificar adecuadamente el impacto de estos agentes, no solo es importante conocer la cantidad total de emisiones, sino que también saber dónde y cuándo se producen. Para tal objeto, el Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2 desarrolló un inventario nacional de emisiones para el periodo 2015-2017, con los principales sectores antropogénicos responsables de la emisión de contaminantes criterio y agentes de cambio climático. Este inventario incluye la ubicación de las fuentes a través de mapas de alta resolución espacial (aproximadamente un kilómetro a nivel nacional).

Al hacer esta desagregación espacial queda en evidencia que el impacto de cada sector varía según la zona geográfica y el contaminante. Si bien en las ciudades del centro y sur de Chile el $MP_{2,5}$ proviene principalmente del uso residencial de leña, en la zona norte proviene de los sectores transporte e industria, mientras que en Santiago es una combinación de todos los sectores anteriores (Figura 1). En tanto, en el total nacional de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), los sectores dominantes son energía y transporte.

Figura 1. Distribución del total anual de emisiones de $MP_{2,5}$ del año 2017 para: (1a) el sector residencial en la zona centro y sur de Chile, con resolución de 0.01 grados y (1b) los sectores transporte, energía y otras industrias a escala regional.



A nivel nacional, el sector residencial representó el 94 % de las emisiones de $MP_{2,5}$ del año 2017 debido al uso de leña para calefacción y cocción de alimentos, las que se distribuyeron de manera diferenciada a lo largo del país. Por ejemplo, en un 75 % de las comunas, más del 80 % de sus emisiones respectivas de $MP_{2,5}$ fueron generadas por fuentes residenciales. Las que contaron con mayores emisiones anuales fueron Osorno, Temuco, Valdivia, Coyhaique, Chillán y Los Ángeles, que poseen políticas de calidad del aire, además de Puerto Montt y Puerto Aysén, que no cuentan con regulaciones (Figura 2). Por otro lado, la importancia del sector residencial es menor en las regiones del Norte Grande, donde las emisiones de $MP_{2,5}$ asociadas a quema de leña no superan el 12 % de las emisiones regionales.

En el caso de las emisiones de los sectores industria y energía, estas se caracterizan por ser puntuales, es decir, estar concentradas en un lugar en particular, lo que afecta la calidad del aire en las localidades próximas. Estas fuentes son muy relevantes para las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), representando el 47 % de las emisiones de este contaminante en el país, y sobre el 95 % en ocho comunas: Puchuncaví, Huasco, Tocopilla, Mejillones, San Gregorio, Primavera, Ranquil y Nacimiento. En cuanto a emisiones de $MP_{2,5}$, industria y energía representan solo el 5 % del total a nivel nacional, aunque en 19 comunas (Machalí, Puchuncaví, Antofagasta, y Diego de Almagro, entre otras) pueden llegar a representar más del 50 %.

Finalmente, el sector transporte se concentra como fuente de emisión de contaminantes en zonas urbanas, especialmente en las principales ciudades del país. Los vehículos con motores de combustión generan, principalmente, $MP_{2,5}$, monóxido de carbono (CO), NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COV).

El año 2017, a nivel nacional, el transporte vial representó un 1 % del $MP_{2,5}$ directo anual, aunque en las comunas de Alto Hospicio, Vallenar y Pudahuel llegó a más de 80 % y, en la provincia de Santiago, representó más de un 50 % de las emisiones anuales en siete de sus 45 comunas. En términos de NO_x , el sector transporte representa el 42 % de las emisiones totales en el país, aunque en 92 comunas representa más del 90 %.



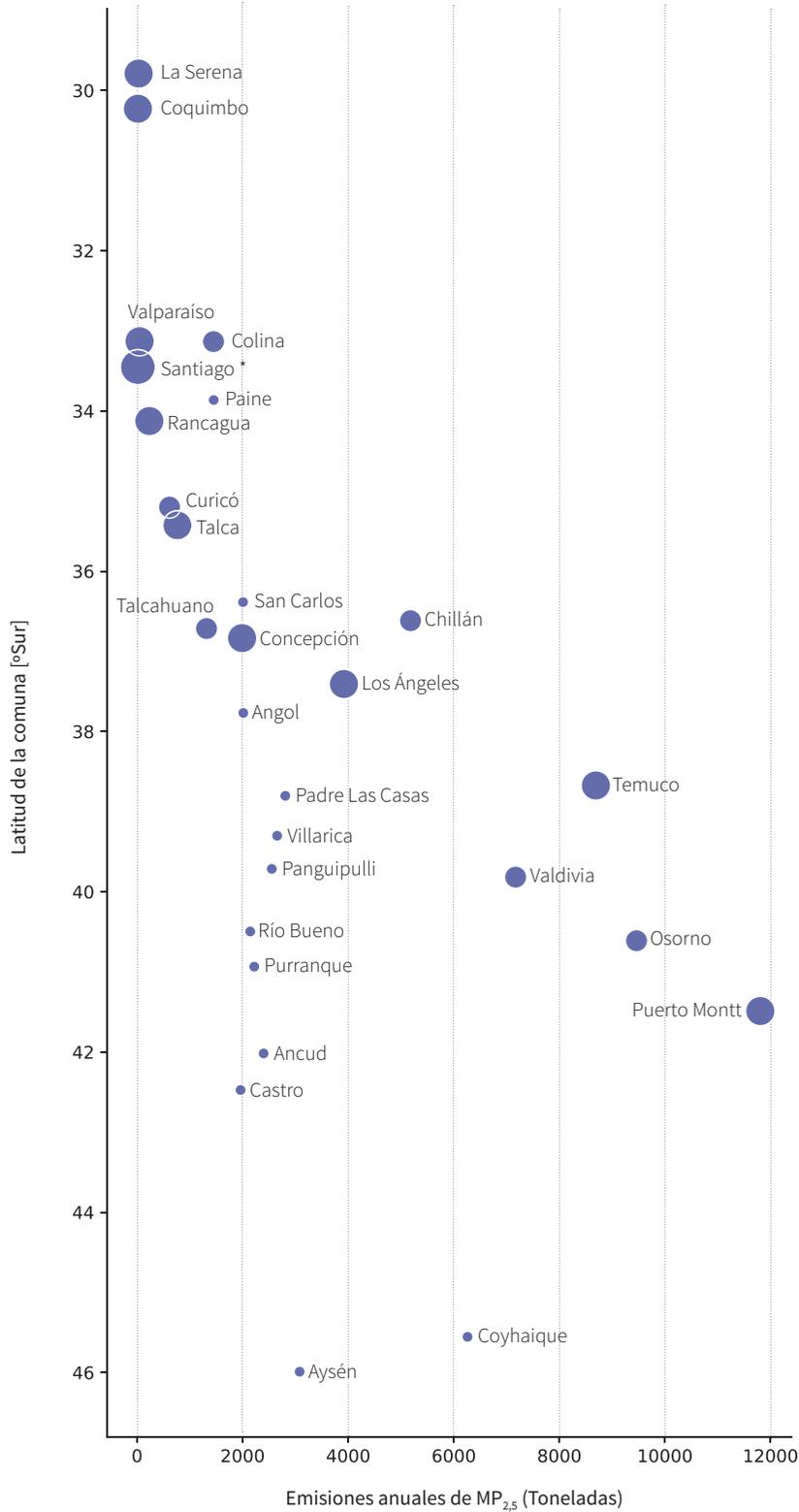


Figura 2: Emisiones 2017 de $MP_{2,5}$ y cantidad de habitantes de algunas comunas de Chile (ordenadas según su latitud). Santiago* corresponde a la comuna de Santiago

2 Factores meteorológicos que inciden en episodios de mala calidad de aire por material particulado en ciudades del centro y sur de Chile

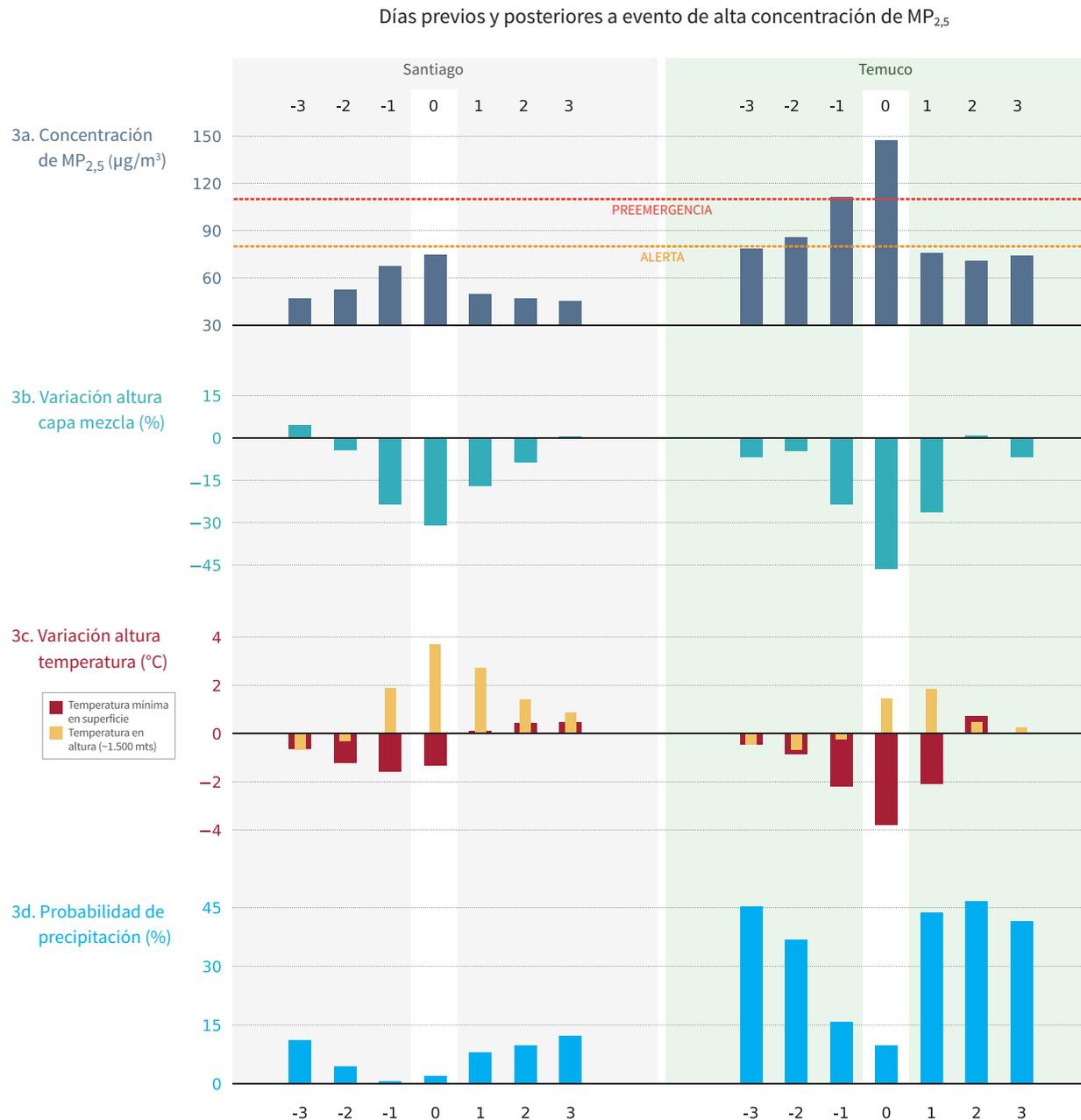
Como se describe en la sección anterior, la concentración de $MP_{2,5}$ en ciudades del centro y sur de Chile responde, en invierno y en gran medida, a altas emisiones por combustión de leña. Sin embargo, condiciones atmosféricas que limitan la dispersión de contaminantes en los valles ubicados entre Los Andes y la cordillera de la Costa representan otro factor clave en la persistencia de altas concentraciones de $MP_{2,5}$ y en la ocurrencia de episodios críticos de mala calidad del aire.

A pesar del contraste de climas en Chile, se identifica un patrón meteorológico común durante episodios de alta contaminación por partículas en ciudades del centro y sur del país. La evolución típica (promedio) de variables atmosféricas durante estos episodios en Santiago y Temuco da cuenta de este patrón (Figura 3). El empeoramiento de la calidad del aire en estas ciudades coincide con: (a) un confinamiento de la capa de mezcla superficial, la sección inferior de la atmósfera donde se percibe el efecto directo de los contaminantes emitidos en superficie; (b) un enfriamiento cerca de la superficie durante la noche y el alba, reflejado en la variación de la temperatura mínima; y (c) un aumento de temperatura en altura (sobre la capa de mezcla).

Un enfriamiento superficial y aumento de temperaturas en altura refuerza la estabilidad atmosférica y limita la mezcla vertical de contaminantes. Este patrón se observa en distintas ciudades, pero con ciertas diferencias. Los eventos de mala calidad del aire suelen ocurrir con baja nubosidad (cielo despejado), permitiendo un mayor enfriamiento superficial nocturno. Este efecto cobra mayor importancia en regiones con una mayor frecuencia de días nublados en condiciones normales, como en el caso de Temuco (Figura 3c). La mayor demanda de calefacción –y aumento asociado de emisiones en regiones con un alto uso de leña residencial (sur de Chile)– es un factor que también puede contribuir a una relación más estrecha entre el enfriamiento superficial y la alta concentración de $MP_{2,5}$.

Ciudad de Temuco

Figura 3. Evolución típica de distintas variables en torno a episodios de alta concentración de $MP_{2,5}$ en Santiago y Temuco. Se indican promedios calculados sobre la base de días con alta concentración de $MP_{2,5}$ (valores sobre la media más una desviación estándar; día 0) seguidos de un día bajo este nivel (día 1), en el periodo de invierno (abril-septiembre) entre 2010 y 2019. (3a) Compuesto de concentración de $MP_{2,5}$, (3b) variación en la altura de capa de mezcla respecto del valor medio, (3c) variación en temperatura mínima cerca de la superficie y de temperatura media en altura (850 hPa) y (3d) probabilidad de precipitación. Fuente de datos: SINCA, Dirección Meteorológica de Chile (observaciones en superficie de $MP_{2,5}$, temperatura mínima y precipitación); Reanálisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio ERA5 (altura capa límite, temperatura media en 850 hPa).



El régimen de precipitaciones es otro elemento de contraste entre regiones, como lo ejemplifican los casos de Santiago y Temuco (Figura 3d). Dado el fuerte gradiente climático de norte a sur, la fracción de días con precipitación en invierno es sustancialmente mayor en Temuco (aproximadamente 40 %) que en Santiago (menor al 10 %). Si bien en ambos casos los eventos de mala calidad del aire suelen ocurrir en días despejados, la probabilidad de finalizar un evento con precipitaciones es claramente mayor en el sur del país, facilitando la remoción de contaminantes.

Las condiciones meteorológicas predominantes durante episodios de mala calidad del aire en Santiago y Temuco se repiten en otras ciudades del centro y sur de Chile, evidenciando un control atmosférico de mayor escala. Los patrones de presión y circulación atmosférica sobre el Pacífico y Atlántico sur en días de alta concentración

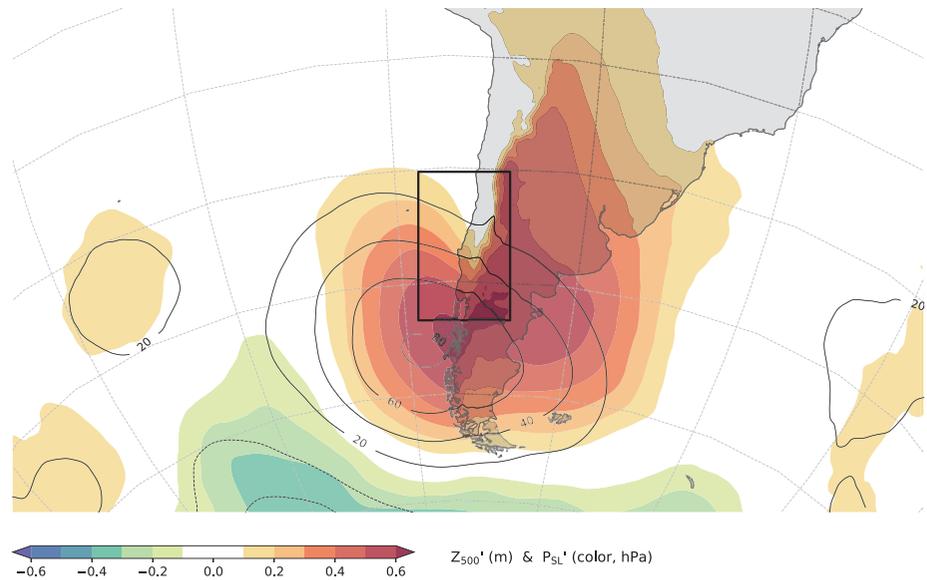
de $MP_{2,5}$ en Temuco ilustra este control de gran escala (Figura 4). Al igual que en casos de alta contaminación en la Región Metropolitana (Rutllant & Garreaud, 1995; Garreaud & Rutllant, 2006), los episodios de mala calidad del aire en Temuco coinciden con el paso de sistemas de alta presión migratorios sobre el Cono Sur, al tiempo que se desarrolla una baja costera al oeste de la cordillera de los Andes (Figura 4a). Este patrón en el campo de presión debilita o invierte la componente oeste del viento (predominante en el centro y sur de Chile), favoreciendo el descenso de masas de aire (subsistencia) sobre la ladera occidental de los Andes (Figura 4b). La subsistencia en esta región comprime el aire y aumenta la temperatura en los niveles medio-bajos de la atmósfera (Figura 4c), intensificando la estabilidad atmosférica y limitando la dispersión de contaminantes en los valles centrales de Chile (una representación esquemática de este mecanismo se presenta en la Figura 5).



A nivel nacional, el sector residencial representó el 94 % de las emisiones de $MP_{2,5}$ del año 2017, debido al uso de leña para calefacción y cocción de alimentos, las que se distribuyeron de manera diferenciada a lo largo del país.

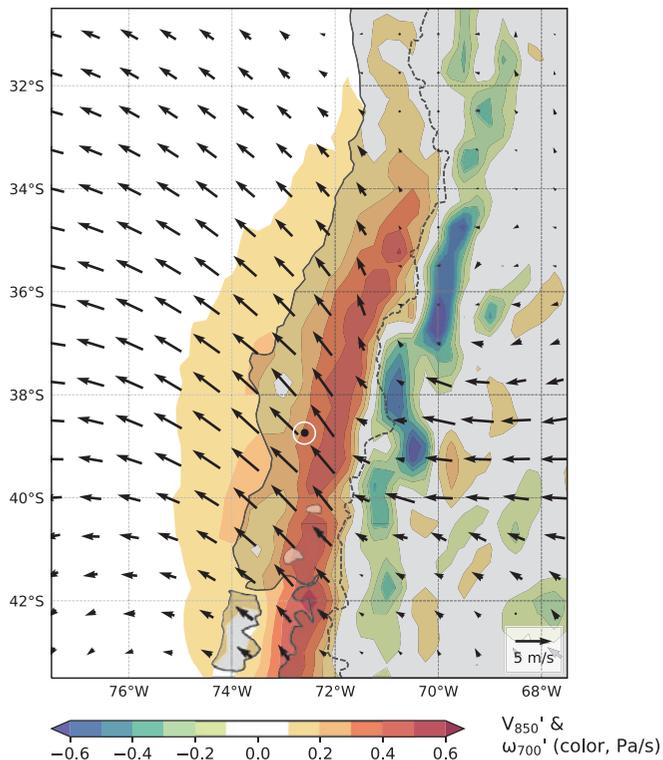
Figura 4. Condiciones atmosféricas de gran escala predominantes durante episodios de mala calidad de aire en ciudades del centro y sur de Chile. Los mapas indican la variación promedio de distintas variables durante días con alta concentración de $MP_{2,5}$ en Temuco (valores sobre la media más una desviación estándar), en el periodo de invierno (abril-septiembre) entre 2010 y 2019. Para la región del Pacífico y Atlántico sur (4a), se indica el compuesto de anomalías de altura geopotencial en la atmósfera media (5.000 metros aproximadamente; líneas de contornos) y de presión a nivel del mar (colores).

4a. Anomalías de presión sobre el Cono Sur

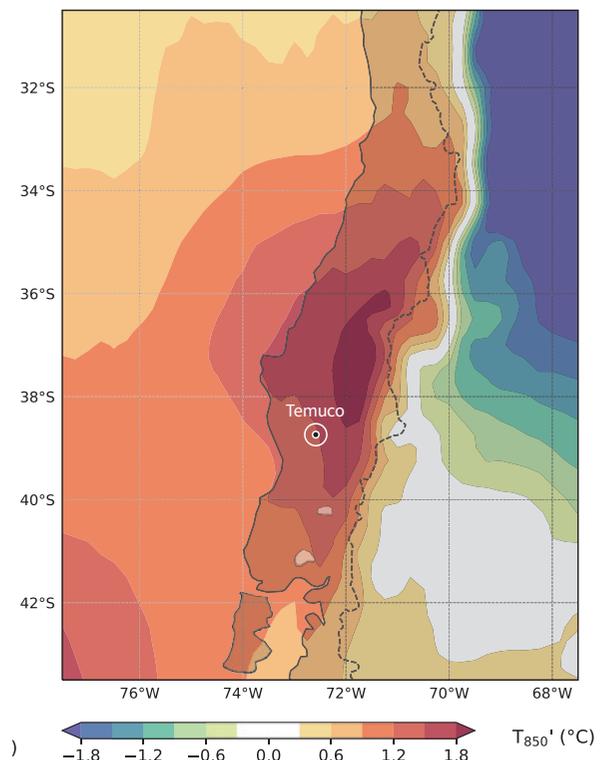


En los niveles medios-bajos de la atmósfera (cerca de 1.500 y 3.000 metros) se muestra con mayor detalle, en el centro y sur de Chile, los patrones de anomalías de: (4b) viento y subsidencia, y (4c) de temperatura. Fuente de datos: Reanálisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio ERA5.

4b. Viento y subsidencia



4c. Temperatura



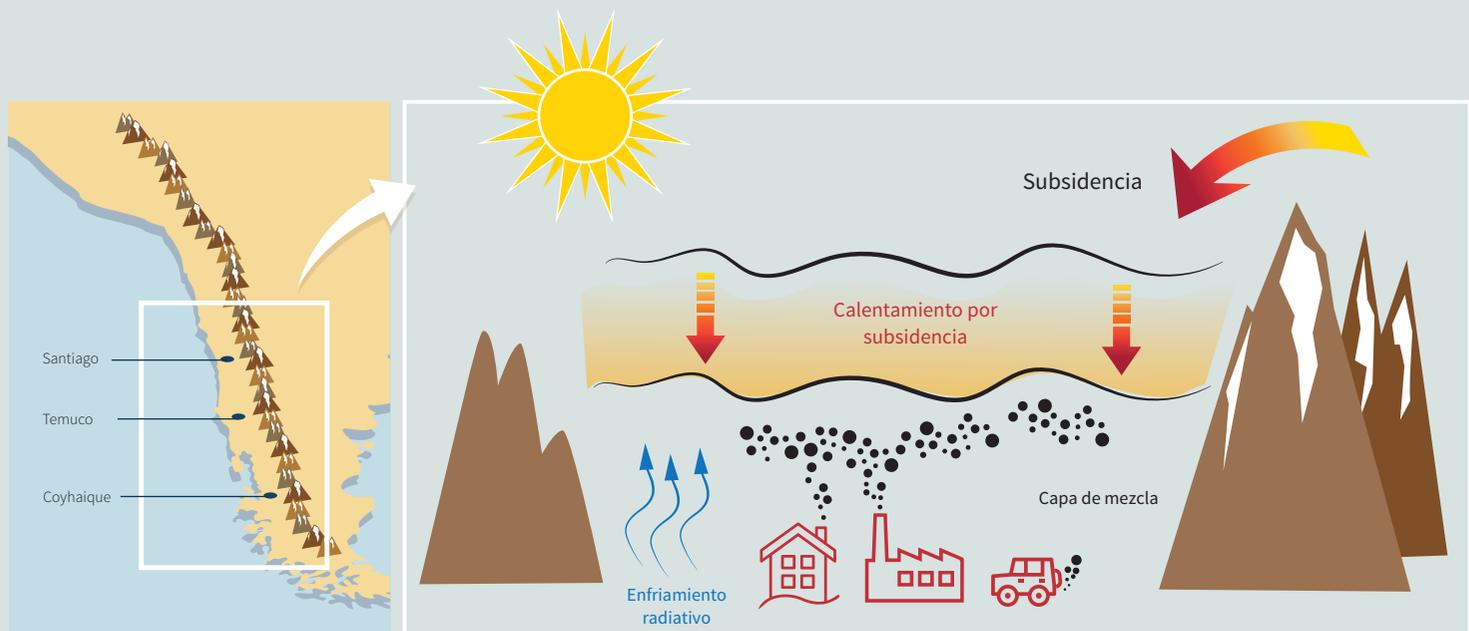
BOX

Caso Coyhaique

Dentro de la red de monitoreo de calidad del aire nacional, Coyhaique presenta los valores más elevados de concentración media y niveles extremos de $MP_{2,5}$, al igual que el mayor número de episodios de Preemergencia ambiental por este contaminante. Estos índices responden a una alta demanda residencial por combustión de leña para calefacción y cocción de alimentos, lo que representa más del 95 % de las emisiones. Por otra parte, una conformación geográfica de valle cordillerano semicerrado y condiciones atmosféricas de gran escala son los forzantes naturales que modulan una menor ventilación en la cuenca.

La condición sinóptica observada durante los eventos críticos de contaminación es similar a la que afecta al centro y sur de Chile, pero con una alta presión (anomalía positiva) centrada típicamente al sur de Tierra del Fuego (Gómez et al., 2018), la que favorece procesos a nivel local, tales como el enfriamiento de la atmósfera cercana al suelo, un debilitamiento del viento oeste y un menor desarrollo de la capa de mezcla superficial, que inhiben el transporte y la dilución de los contaminantes atmosféricos emitidos en la ciudad. Esta situación es particularmente crítica en condiciones invernales (días fríos), cuando ocurre una alta emisión local de $MP_{2,5}$ por calefacción (Figura 5).

Figura 5. Representación esquemática de los procesos atmosféricos que contribuyen a la ocurrencia de eventos de mala calidad del aire en el centro y sur de Chile: la subsidencia comprime el aire sobre la ciudad y aumenta la temperatura en los niveles medio-bajos de la atmósfera. Esto intensifica la estabilidad atmosférica y limita la dispersión de contaminantes dentro de la capa de mezcla. Estos eventos suelen ocurrir con cielo despejado lo que permite un mayor enfriamiento en la superficie y esto, a su vez, puede contribuir a un aumento en las emisiones asociadas a la quema de leña para calefacción residencial.



BOX

Carbono negro

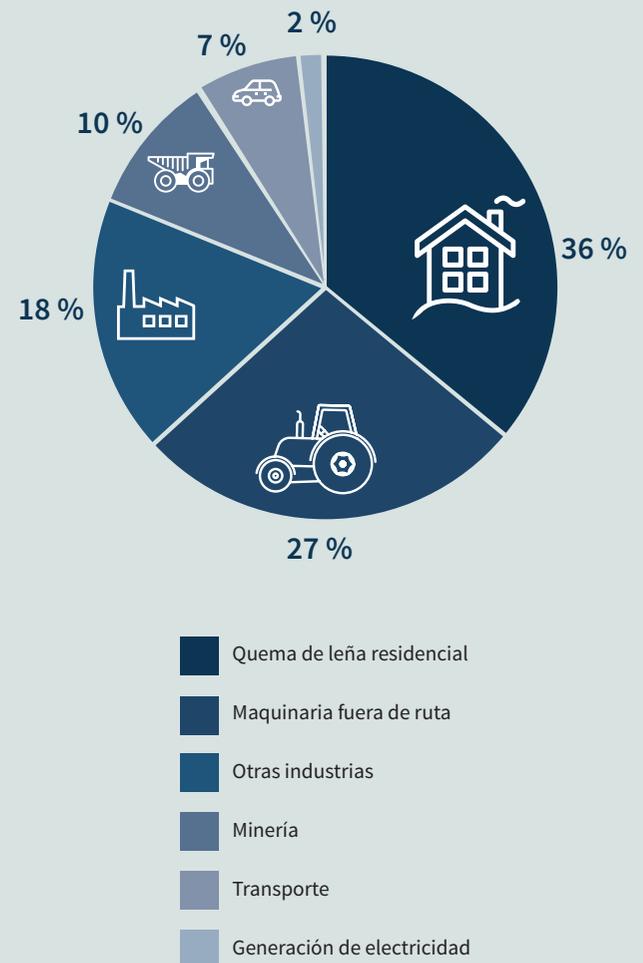
El carbono negro (CN) es una partícula sólida en suspensión que forma parte del material particulado fino completamente respirable ($MP_{2,5}$), es decir, un contaminante del aire que afecta la salud y los ecosistemas. Además, es un agente de cambio climático, ya que es capaz de absorber la radiación solar y, debido a su breve estadía en la atmósfera, se considera un forzante climático de vida corta. Estudios recientes muestran que su reducción podría ser la clave para limitar el aumento de temperatura de 2 °C a 1,5 °C al final de este siglo.

El CN se genera, principalmente, en condiciones de quema incompleta de combustibles fósiles y biomasa, tanto en procesos de combustión interna como en llamas abiertas. El principal sector de emisión en Chile es la quema de leña residencial. El inventario usado en este informe estima las emisiones del sector residencial en 18 mil toneladas para el año 2016 (ver Sección 1 de este capítulo).

En la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile de 2020 (NDC por sus siglas en inglés) se reconoce la importancia del CN para alcanzar la carbono neutralidad al año 2050 y se compromete una meta de reducción de las emisiones de este contaminante en, al menos, un 25 % al 2030, con respecto al año base 2016 (Gallardo et al., 2020). En la NDC se estiman las emisiones totales de CN para Chile en 10.2 miles de toneladas al año 2016, siendo el sector residencial responsable de un 36 % (Figura 6). Las diferencias entre ambos inventarios obedecen, en primer orden, al uso de factores de emisiones diferentes para CN (ver Box a continuación y el Capítulo 6).

La mitigación de las emisiones de CN tiene el potencial de contribuir tanto a reducir el cambio climático como a mejorar la calidad del aire. Sin embargo, para cuantificar bien el alcance potencial de esta dualidad, se deben generar inventarios nacionales robustos, que incluyan el carbono negro con la mayor resolución espacial posible y con metodologías que permitan disminuir la incertidumbre en sus emisiones. Con ello se lograría cuantificar el doble beneficio de las políticas que se apliquen.

Figura 6. Distribución sectorial de emisiones de carbono negro en Chile para el año 2016 (Gallardo et al., 2020).



Análisis de incertidumbre en las emisiones

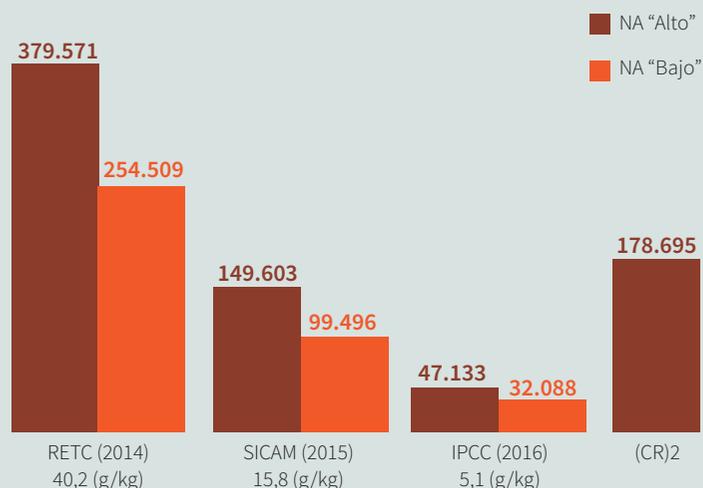
Existe una significativa incertidumbre en la estimación de las emisiones, lo que se traduce en una incerteza en la estimación de sus impactos y los efectos de las políticas públicas para su abatimiento. Estas incertidumbres se deben, fundamentalmente, a la caracterización de la actividad (e.g. cantidad de leña quemada por año o kilómetros recorridos por autos particulares) y su factor de emisión asociado (e.g. gramos de $MP_{2,5}$ emitidos por Kg de leña quemada, esto es, masa de contaminante emitido por unidad de actividad). Para el caso del sector residencial, el nivel de actividad proviene de la información recolectada a través de encuestas a hogares, entre las que destacan levantamientos nacionales (CASEN 2013, CDT 2015) y diversos estudios locales. Los factores de emisión utilizados varían según la forma de cuantificar el consumo de leña, su contenido de humedad, la eficiencia de la tecnología de combustión utilizada y las condiciones de operación de los artefactos (por ejemplo, el uso del tiraje del calefactor). Por lo tanto, la determinación de qué factores de emisión se deben utilizar para un inventario es compleja y difícilmente extrapolable entre países o territorios con características diferentes.

En la Figura 7 se muestran distintas estimaciones para $MP_{2,5}$ emitido por el sector residencial en Chile. Como se aprecia, las emisiones de $MP_{2,5}$ pueden variar significativamente dependiendo de los supuestos de nivel de actividad (NA) y de factores de emisión; el nivel de actividad puede duplicarse en algunas regiones, mientras que, dependiendo de qué factor de emisión se utilice, las emisiones pueden variar más de diez veces.

La incertidumbre que existe asociada a los inventarios de emisiones incide en la estimación de efectividad de los planes diseñados para prevenir o disminuir la contaminación atmosférica. Por ello, es imperioso contar con información de calidad que permita construir inventarios con menor incertidumbre y mejorar la toma de decisiones asociadas a la calidad del aire.

En el caso de Chile, resulta particularmente clave medir con métodos estandarizados, controlados y reconocidos, los factores de emisión por quema de leña para diversos sistemas de calefacción.

Figura 7. Emisiones de $MP_{2,5}$ (toneladas) por quema de leña residencial en Chile para el año 2017 según posibles factores de emisiones (RETC, SICAM, IPCC). Se incluye la estimación (CR)2 realizada para este informe, que ilustra su magnitud en relación al rango de emisiones indicados.





CAPÍTULO 3

Condiciones socioculturales en la transición energética

Autores:

Anahí Urquiza

Catalina Amigo

Marco Billi

Gustavo Blanco

Javiera Chahuán

Natalia Gajardo

Pablo Iriarte

Matías Plass

Sofía Salinas

Sebastián Santander

7 | Condiciones socioculturales del uso intensivo de leña: caso de Temuco, Valdivia y Coyhaique

La leña ha sido históricamente el principal combustible para calefacción en el centro y sur de Chile, donde la temporada fría puede extenderse desde abril a noviembre. Ello ha contribuido a los problemas de contaminación atmosférica en los principales centros urbanos de esta zona. Entre las ciudades más afectadas se encuentran Temuco y Padre Las Casas, Valdivia y Coyhaique.

Considerando la relevancia de estas ciudades se realizó un análisis en profundidad del problema de la contaminación atmosférica desde el punto de vista sociocultural, a través de una investigación cualitativa (entrevistas a expertos, etnografías en hogares, mesas de trabajo y revisión de documentación), lo que permitió identificar aspectos que operan como barreras u oportunidades para enfrentar la contaminación atmosférica y avanzar en la transición energética, los que serán tratados en este capítulo y en el siguiente.

El tipo de combustible, los artefactos para combustión y la aislación térmica de la vivienda, determinan tanto las posibilidades de calefacción de un hogar como los focos de la acción pública para impulsar una transición energética. Estas variables se combinan de modo heterogéneo en la población de cada ciudad, lo que implica un desafío de focalización importante para la acción pública.

En relación con el **combustible**, la leña es valorada y preferida tanto por ser el energético de menor precio como por el calor que entrega, el cual se percibe como diferente respecto del que generan otros combustibles. Si bien la mayoría de los entrevistados declara preferir la leña seca, también optan por la leña húmeda debido al precio y porque les permite “hacer durar” el fuego. La leña también es valorada porque es posible acceder a ella por medios distintos al dinero, como la recolección en

Ciudad de Temuco

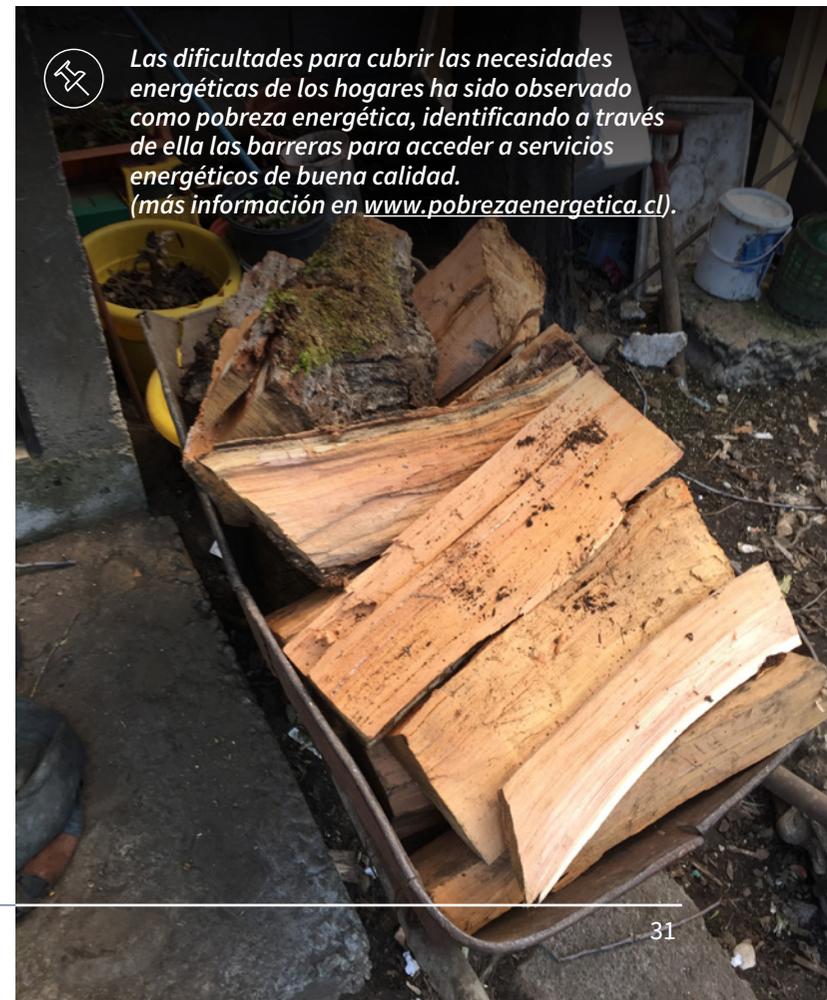
terreno propio o ajeno (privado o público), intercambio y/o beneficios asociados a redes de amistad, parentesco o laborales (regalías).

En relación con los **artefactos a leña**, estos son valorados por su multifuncionalidad (especialmente las cocinas tradicionales) y porque además de quemar leña –que es el combustible más barato– permiten la combustión de otras cosas, como restos de poda, papel, cartón, plásticos, zapatos, ropa, entre otros. Para hogares de menores ingresos, ello constituye una alternativa disponible cuando enfrentan problemas económicos y necesitan calefaccionar la vivienda. Sin embargo, la mayor parte de los hogares entrevistados declaran tener sistemas complementarios (gas, parafina o, excepcionalmente, electricidad), cuya elección depende, principalmente, de las diferencias de ingresos y las preferencias por ciertas ventajas que estos otros artefactos brindan.

La **aislación de las viviendas** es fundamental para el funcionamiento eficiente de los sistemas de calefacción. Una mala aislación térmica implica que, para alcanzar un umbral básico de temperatura y confort, se requiere invertir una gran cantidad de energía por unidad de tiempo elevando los costos de las fuentes energéticas. Estudios recientes muestran que un factor que incide en el alto consumo de leña es, justamente, la baja eficiencia térmica de las viviendas (Schueftan et al., 2016). Sin embargo, mejorar las viviendas es una inversión que excede las posibilidades presupuestarias de muchos hogares, por lo que se identifican una serie de prácticas para mejorar la gestión del calor, como el uso de frazadas, cobertores y/o planchas de cholguán para cubrir puertas y/o ventanas, entre otras.

Cabe destacar que, en Chile, las normas de construcción incorporaron especificaciones sobre aislación térmica recién a partir del año 2000, complementándose en el 2007. Esto implica que gran parte de las viviendas construidas con anterioridad son precarias desde un punto de vista térmico, a lo que se suman las viviendas autoconstruidas que, generalmente, incumplen las normas por el mayor costo que involucran los materiales de aislación.

Otro elemento identificado se refiere a la composición de los hogares. La presencia de población vulnerable, como niños/as y personas mayores, justifica, a menudo, la necesidad de mantener la calefacción encendida durante todo el día en la vivienda, lo que implica un mayor requerimiento energético.



Las dificultades para cubrir las necesidades energéticas de los hogares ha sido observado como pobreza energética, identificando a través de ella las barreras para acceder a servicios energéticos de buena calidad. (más información en www.pobrezaenergetica.cl).

2 | Barreras para la transición energética

Pese a que en ocasiones se llega a percibir el olor a humo dentro de las viviendas por el uso de la leña –lo que es coherente con investigaciones que demuestran que los niveles de contaminación atmosférica al interior de las casas suelen ser más altos de lo que los moradores perciben– y que la contaminación atmosférica es percibida por sus **enfermedades** asociadas, sobre todo en personas vulnerables, existen barreras para transitar de la leña a otros tipos de calefacción. Estas barreras son sociotécnicas y socioculturales.

Las **barreras sociotécnicas** están principalmente asociadas a las características de las viviendas: la autoconstrucción, aislación térmica irregular y deficiente; el espacio reducido o deteriorado para almacenamiento de leña; la falta de conocimientos en eficiencia energética de empresas locales, sumado a la poca variedad, disponibilidad y altos costos de materiales para construcción y reacondicionamiento de viviendas a nivel local.

Las **barreras socioculturales** tienen relación con: el arraigo cultural a la cocina a leña por su multifuncionalidad, la definición de umbrales de confort térmico y estándares de calidad de la leña, la autoevaluación positiva de las condiciones térmicas de la vivienda y el “olvido programado” del problema (pues la contaminación parece relevante solo en invierno). Además, el frío sigue siendo percibido como un problema más importante que el de la contaminación. En este contexto, la consolidación de la leña no obedece solo a la abundancia y al precio, sino también a la precariedad de las viviendas (barrera sociotécnica), que no permiten retener el calor necesario para alcanzar las temperaturas de confort a las que las personas están acostumbradas. Estas barreras están acompañadas de otras, como las condiciones de mercado y de la institucionalidad, las que son abordadas en el capítulo 4.

Pese a lo anterior, es preciso destacar que la mayoría de los hogares muestra disposición a cambiar desde la leña hacia otras energías, especialmente si estas permiten reducir los gastos del hogar. En particular, se identifica una mayor disposición al cambio en las generaciones más jóvenes, las que valoran la comodidad de los nuevos artefactos, pese a que valoran igualmente el poder calorífico de la leña. En contraste, quienes presentan mayores resistencias suelen ser las personas mayores, que declaran estar arraigadas a la leña, aunque también algunas de ellas señalan que el esfuerzo físico es demasiado y estarían dispuestas a un cambio si les resultara conveniente. Aquí también aparece el desconocimiento de las características, manejo y mantención de las nuevas tecnologías, pues, aunque bajen de precio, se perciben como extrañas o ajenas.

En este contexto, la alternativa que parece ser mejor valorada para optar por un cambio de calefactor es el pellet. Sin embargo, este recambio se asocia con un aumento en el gasto en combustible para alcanzar la temperatura mínima saludable y, más aún, para alcanzar los niveles de confort a los cuales se encuentran acostumbrados (debido en gran parte a la mala aislación térmica de las viviendas). Consecuencia de lo anterior, algunos hogares declaran que, de reemplazar la leña como combustible, debiera ser por otro combustible igual de asequible para todos.

De manera transversal, se suele mencionar como solución la posibilidad de que el Estado genere un subsidio al gas natural y/o a la electricidad, considerando este beneficio para toda la población, como funciona, por ejemplo, en Magallanes. Pese a esto, además de consideraciones geopolíticas, es importante considerar la evaluación de la viabilidad técnico-científica de medidas como estas, y los impactos que, a su vez, podrían tener sobre el medioambiente y los desafíos de transición energética.

Testimonios¹:



“Me muevo de alguna manera para tener la leña, ya sea que la salgamos a buscar o que salga mi marido a buscarla al río, nos vamos al campo, traemos leña qué sé yo. (...) Y si se me termina el pellet, ¿qué hago? No lo voy a salir a buscar al árbol... ¿Te das cuenta? Entonces es eso, ¿qué alternativa me daría a mí el Estado si yo cambio la estufa?”.

Gloria, 53 años, Temuco, 2019

“Tenían una pura cocina, porque las combustiones lentas antes no existían. (...) Siempre la cocina a leña ha estado en todos los hogares (...) por eso no, se me hace difícil deshacerme. (...) yo lo veo por mi punto de vista que uno está, como dicen, arraigado con la leña”.



Eliana, 56 años, Coyhaique, 2019



“Si te venden leña seca piden treinta y dos, treinta y cuatro (mil pesos) (...) entonces la gente compra leña y las revuelve (...) la seca con la húmeda”.

Fernando, 70 años, Valdivia, 2019

¹ Para mayor información, leer "Análisis: Testimonios del uso de la leña en el sur de Chile" [material complementario](#)



"Vulnerabilidad Energética Territorial es la falta de capacidad de un territorio para garantizar acceso equitativo —en calidad y cantidad— a servicios resilientes que permitan el desarrollo humano y económico sostenible de su población"

(mas información en www.pobrezaenergetica.cl)



CAPÍTULO 4

Condiciones económicas e institucionales en el uso de leña

Autores:

Anahí Urquiza
Nicolás Álamos
Catalina Amigo
Damaris Arrieta
Rubén Calvo
Montserrat Castro
Javiera Chahuán
Luis Cordero
Victoria Correa
Julián Cortés
Zoë Fleming
Ximena Insunza
Julio Labraña

1 | Mercado de la leña¹



El mercado de la leña en Chile mueve anualmente cerca de 200 millones de dólares, con más de 100 mil personas empleadas (CONAF, 2017; Román & Lozada, 2016). Además, presenta una serie de **externalidades positivas**: a nivel socioeconómico, presenta una alternativa de energía de menor precio, es una importante fuente de empleos, genera ingresos y contribuye a fortalecer los mercados locales, y a nivel ambiental, se considera, hasta ahora, neutra en cuanto a emisiones de carbono (IPCC, 2006) y, por lo tanto, se puede considerar que su uso evita emisiones de GEI. No obstante, estas externalidades positivas se dan simultáneamente con una serie de **externalidades negativas**. Primero, el uso de la leña se encuentra frecuentemente asociado con la degradación de los bosques y la contaminación atmosférica; segundo, si bien ayuda a la creación de empleos, estos son, generalmente, precarios, discontinuos, con una alta evasión tributaria y un alto grado de informalidad en las etapas de producción y comercialización.

Junto con esto, el mercado de la leña se encuentra atravesado por diversos tipos de vínculos de parentesco y sociales, lo que opera como una barrera importante a la hora de pensar en intervenirlo. Existe también una diversidad de formatos de venta (vara, choco, metro, etc.) y de unidades de medida (camionada, camionetada, carretilla, metro, saco, etc.), las cuales dificultan la cuantificación de este combustible, tanto para los consumidores como para vendedores y reguladores.

En este mercado se presentan tres actores principales: productores, comercializadores y consumidores, cada uno con sus características (ver Glosario). La Tabla 1 muestra el rango de consumo de leña a nivel regional², mientras que la Figura 1 muestra qué porcentaje de hogares utiliza la leña para calefacción, cocina y calentar agua.

¹ Para mayor información sobre el mercado de la leña en Chile vea RedPE (2020) <http://redesvid.uchile.cl/pobreza-energetica/documentos-redpe>

² Los resultados se encuentran actualizados al año 2017 y consideran como límite inferior el consumo estimado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT, 2015) y como límite superior las encuestas levantadas por el Observatorio de Combustibles Derivados de la Madera (OCDM) (Reyes, 2017). Para las regiones que estas instituciones no han levantado información, se utiliza como límite superior del rango las estimaciones de la Universidad Austral (UACH) y del Instituto Forestal (INFOR), las cuales, a pesar de no provenir de una fuente primaria, están disponibles para todas las regiones y son similares en rigurosidad respecto de CDT y OCDM.

En relación al Sistema Nacional de Certificación de Leña, los hogares entrevistados declaran, en general, conocerlo poco o nada, no distinguiendo bien la diferencia entre leña seca y leña certificada. Muchas

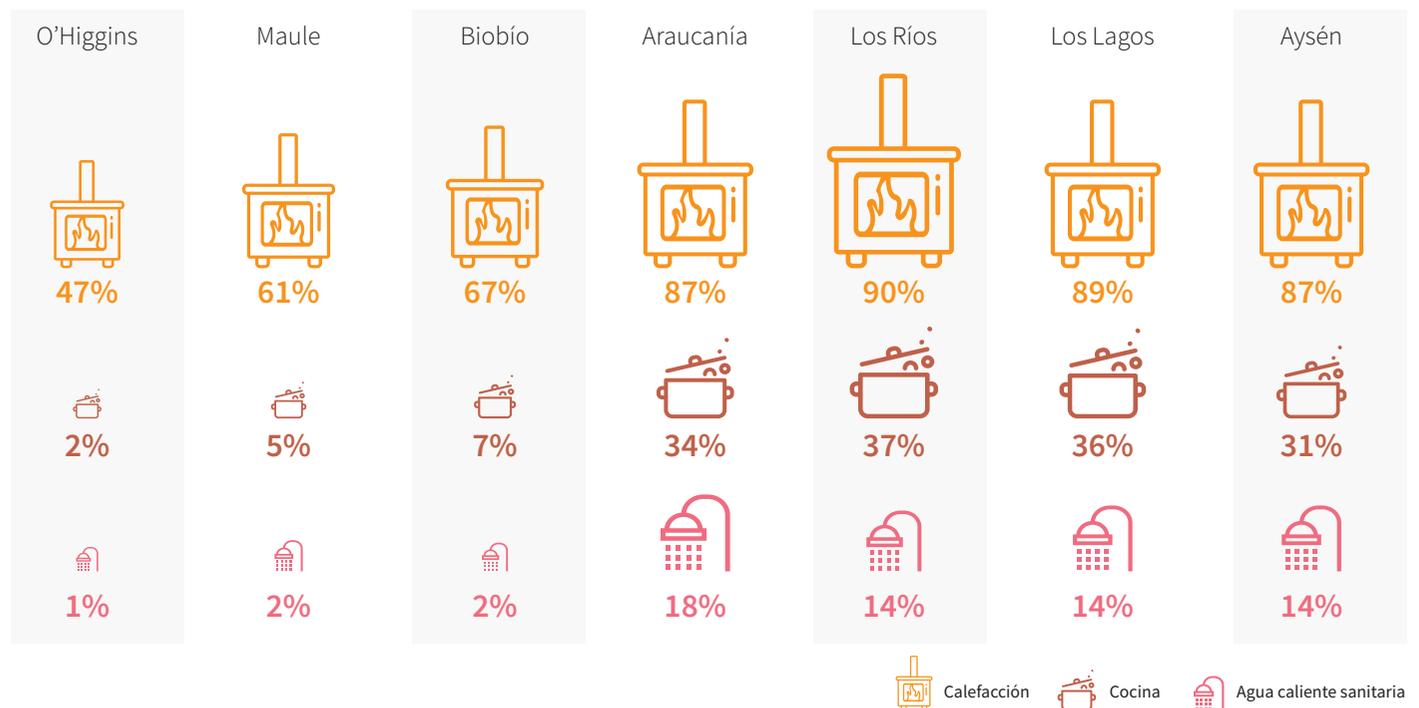
veces ambos términos son utilizados como sinónimos, pese a no serlo. Se evidencia una mayor penetración de este sistema en el caso de Valdivia.

Tabla 1. Consumo total de leña por región política en metro cúbico estéreo (m³ st)

Región	Porcentaje de hogares que usan leña	Número de viviendas	Consumo Inferior (m3 st)	Consumo Superior (m3 st)	Fuente
RM	5 %	2.378.490	281.940	326.446	UACH(2013)
O'Higgins	48 %	354.324	591.112	1.048.724	Reyes et al. (2020)
Maule	61 %	411.211	879.875	1.806.887	Reyes et al. (2018)
Biobío	67 %	768.162	2.813.436	4.495.239	INFOR (2019)
Araucanía	86 %	381.170	2.517.281	4.714.219	INFOR (2019)
Los Ríos	90 %	153.990	1.945.422	1.961.807	Reyes (2017)
Los Lagos	92 %	332.935	4.235.207	5.647.570	UACH (2013)
Aysén	95 %	44.726	741.196	1.364.923	UACH(2013)
Magallanes	2 %	65.641	19.071	29.964	UACH(2013)
Total*	70%**	4.890.649	14.024.541	21.030.204	

*El total se refiere a las regiones presentadas en la tabla, no corresponde al total nacional. **Para el Porcentaje de hogares que usan leña, el total corresponde al número total de viviendas en las regiones de la tabla (sin la RM) que usan leña y no al promedio de los porcentajes.

Figura 1. Porcentaje de hogares, por región, que utiliza la leña para calefactar, cocinar y/o calentar agua. Fuente: CASEN 2017.



2 | Marco normativo del mercado de la leña

Un análisis del marco jurídico nacional sobre la leña muestra que las regulaciones pueden ser:

- **De cuerpos normativos directos**, que la regulan por su condición orgánica, como el Código Civil.
- **De cuerpos normativos indirectos**, que la abordan tangencialmente, como la Constitución Política de Chile (1980).
- **De cuerpos normativos híbridos**, que consideran a la leña en su naturaleza orgánica y, al mismo tiempo, regulan su utilización como combustible sólido, como el Decreto N° 4.363 Ley de Bosques.
- **De cuerpos normativos de institucionalidad**, cuyo foco no es la naturaleza de la leña o sus efectos, sino la creación de un aparato institucional que haga operativo el ordenamiento jurídico, como la Ley 20.417, que crea el Ministerio del Medio Ambiente.

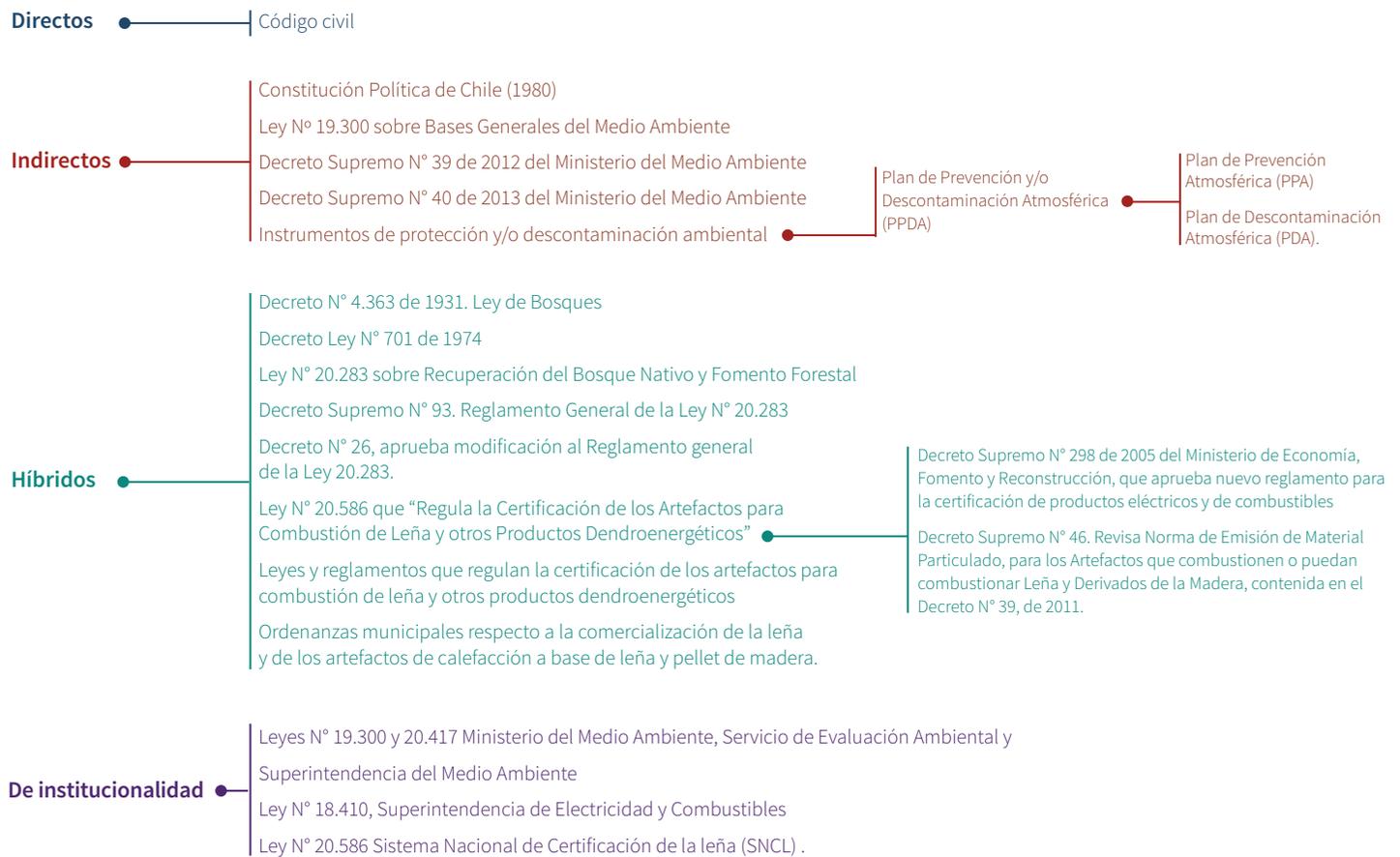
Una representación esquemática de este marco jurídico se incluye en la Figura 2.

Si bien el tipo de legislación de la leña vigente en Chile tiene la ventaja de permitir una implementación gradual de políticas públicas, programas y planes, por no requerir modificaciones legales o institucionales significativas, contrasta con la dificultad que supone para generar instancias de coordinación institucional de orden general. En este sentido, al optar por soluciones legislativas de intervención local y no sistémicas, se obtiene como resultado un **tratamiento fragmentado de la leña en el marco jurídico**.

Es relevante en este contexto la **ausencia del reconocimiento legal de la leña como biocombustible sólido**. La confusión provocada por la fragmentación normativa ha llevado a que la discusión en torno a la naturaleza dendroenergética de la leña, y su reconocimiento, se encuentre todavía estancada. Si bien se han presentado desde proyectos de modificación al

Código Sanitario (Boletín N° 10.180-12) hasta iniciativas parlamentarias (Boletín N° 6572 03), a través de la modificación de la Ley N° 18.410, la generación de una normativa integral para regular el mercado de la leña se encuentra aún pendiente, lo que constituye una barrera jurídica a la resolución del problema de la contaminación atmosférica.

Figura 2. Cuerpos normativos del mercado de la leña en Chile



3

Planes de
Descontaminación
Atmosférica

Ciudad de Temuco

Para iniciar la elaboración de un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) en un determinado territorio, primero se debe contar con una medición que justifique la declaración de zona saturada y, luego, transitar por un largo proceso para que después de varios años se dicte un PDA. En términos generales, las medidas más reconocidas de los PDA son el Programa de Recambio de Calefactores y, para el caso de Valdivia y Temuco, las restricciones de uso de artefactos a leña³.

Las medidas de Mejoramiento Térmico de Viviendas son conocidas por algunos de los hogares entrevistados, pero, en general, se caracterizan como excesivamente burocráticas, lo que desincentiva la postulación. Esto se relaciona fundamentalmente con tener que participar de reuniones de los Comités de Vivienda y gestionar aspectos como la regularización de los hogares, que suelen ser difíciles para aquellos que presentan autoconstrucción.

Las medidas restrictivas presentan una doble cara. Por un lado, se señala la importancia de aumentar la fiscalización de los hogares que usan leña húmeda, pero, por otro, también se han desarrollado prácticas para evadirla. A nivel general, las medidas de restricción en Temuco se perciben como poco efectivas y cortoplacistas, debido a que solo algunas personas las respetan y se continúan utilizando artefactos a leña para calefaccionar los hogares. Además, en las entrevistas se menciona que en invierno las restricciones se aplican “a criterio” de los fiscalizadores, ya que, generalmente, fiscalizan más a los sectores de clase media que a los sectores de ingresos bajos, lo que se cree es debido a que estos no tendrían cómo reemplazar el artefacto que deben apagar por la restricción. En Valdivia la restricción es más reciente y la percepción en los hogares entrevistados es similar al caso de Temuco, mientras que en Coyhaique, actualmente, solo se limita la cantidad de artefactos encendidos por vivienda.

³ Si bien nuestro ordenamiento jurídico contempla la posibilidad de dictar planes de prevención y/o descontaminación, el objeto de estudio fueron solo los Planes de Descontaminación relativos a $MP_{2,5}$.

Cabe destacar que en el caso particular de Temuco, los hogares entrevistados critican fuertemente las medidas del PDA –que en esta ciudad ya llevan más de 10 años– por ser poco efectivas en la reducción de la contaminación. Por su parte, en Valdivia se observa un mayor interés por el mejoramiento paulatino de las condiciones de vivienda y por contar con sistemas complementarios de calefacción.

Respecto a las medidas de restricción, en Valdivia y Temuco los hogares entrevistados declaran no conocer bien cuáles son las restricciones y, en general, califican esta información como confusa. Además, parte de estos indican que no respetan las restricciones establecidas, debido a las condiciones de bajas temperaturas del invierno que les imposibilitan apagar uno o la totalidad de sus artefactos a leña.

Ahora bien, cabe destacar que los PDA, como política pública, presentan serios problemas en términos de sus mecanismos de participación social, sus vínculos con el conocimiento científico y sus capacidades de reformulación en un entorno altamente cambiante.

En el caso de la participación social, la actual regulación nada dice sobre las metodologías o formas en que se debe llevar a cabo este proceso y tampoco sobre el deber de dar respuesta a quienes hubiesen realizado observaciones en esta etapa, ni explicar cuáles son las medidas adoptadas o corregidas en la versión final del proyecto tras la consulta pública.

Por otra parte, la participación de personas expertas no considera su intervención activa u orgánica más allá de la integración a los comités ampliados o en la etapa de observaciones ciudadanas, como cualquier otra persona interesada. Es más, la elaboración del estudio de impacto económico y social no contempla



la participación formal de estas. Como consecuencia, los PDA corren el riesgo de convertirse en herramientas inadecuadas, sea por su falta de legitimidad social, su desconexión con los últimos hallazgos científicos con relación al problema de la polución o por su restringida capacidad de respuesta. Con excepción de propuestas puntuales, como la energía distrital en casos pilotos y algunas propuestas institucionales para reemplazar leña o carbón por gas, no existen propuestas conocidas que aborden soluciones de transición energética multimodal. Tampoco hay estudios sistemáticos orientados a transiciones de las ciudades más críticas o propuestas integrales de largo plazo que tengan la calidad tecno-científica para abordar el problema.

Junto con esto, en lo que respecta a las condiciones jurídicas, se identifican como barreras:

- Los extensos tiempos requeridos para declaración de zona saturada y elaboración de los PDA, lo que se traduce en una dilatación y gestión ineficiente del problema.
- La dificultad de regulación y formalización de la leña al no ser considerada combustible por ley.
- La exclusión de las cocinas a leña de la normativa de emisiones.
- La inexistencia de una norma de calidad de pellet.
- La deficiente fiscalización asociada a la normativa térmica, que define su fiscalización solo a nivel de proyecto sin supervisión en obras.
- La falta de normativas relacionadas a condiciones de posibilidad para la calefacción distrital, entre otras.
- La falta de coordinación de los responsables de las medidas establecidas en los PDA.
- La escasa fiscalización y sanción de las medidas contenidas en ellos.

En relación a las barreras políticas se identifica:

- La baja autonomía en la toma de decisiones de instituciones regionales por el modelo de gobernanza centralista.
- Los altos costos de inversión del Estado para la solución del problema estructural de vivienda.
- La definición de soluciones estructurales que dependen de decisiones políticas sin consideraciones de criterios técnicos y científicos.
- La inestabilidad asociada al cambio de gobierno que no permite trazabilidad de iniciativas públicas.
- La fragmentación de acciones político-institucionales orientadas por objetivos sectoriales que generan duplicación de esfuerzos y dificultan la coordinación intersectorial.
- La falta de seguimiento y fiscalización a infraestructura disponible.

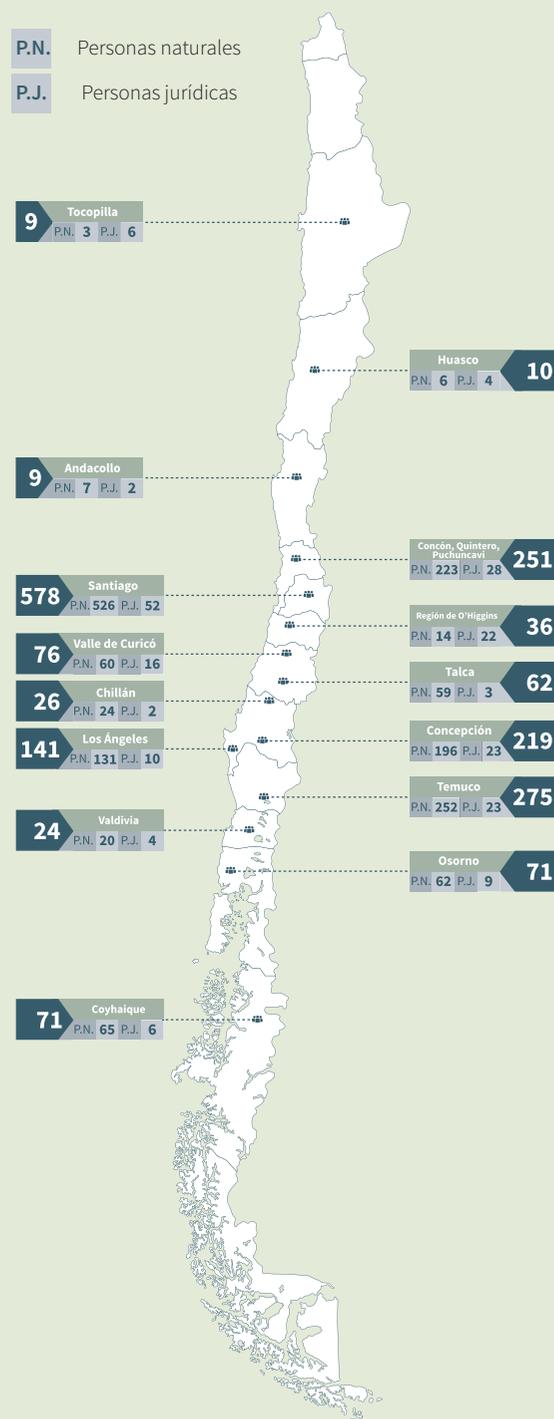


Participación ciudadana en los PPDA y PDA

En términos generales, menos del 5 % de la población total de las zonas geográficas reguladas en cada uno de los planes es parte de los procesos de participación ciudadana. Esto se podría explicar por problemas de difusión de la información y educación ambiental, y ausencia de herramientas adecuadas, generadas por una brecha de conocimiento, lo que podría limitar el acceso de determinados grupos de la población.

Existen evidentes diferencias regionales sobre el comportamiento de las comunidades (Figura 3). Mientras en la macrozona norte el número de participantes no supera las 10 personas, en Temuco se consigna la participación de 275 observantes y en Coyhaique 71. El comportamiento en la zona central es distinto: solo para el PDA de Santiago se formularon 1.053 observaciones.

Figura 3. Participación ciudadana en los PPDA y PDA







CAPÍTULO 5

Impactos de la contaminación atmosférica en la salud en un contexto de desigualdad ambiental y vulnerabilidad

Autores:
Rodrigo Arriagada
Ignacio Casielles
Pamela Smith
Macarena Valdés

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la contaminación atmosférica es uno de los desafíos más importantes a nivel mundial y constituye el principal riesgo ambiental para la salud en las Américas. Adicionalmente, la *Lancet Commission on Pollution and Health*¹ declara que la contaminación del aire representa la causal medioambiental más importante de enfermedades y muertes prematuras en el mundo. En el año 2015, se estimó que 9 millones de muertes prematuras fueron causadas por problemas de polución —16 % de todas las muertes a nivel mundial— lo que es tres veces más que las muertes causadas por SIDA, tuberculosis y malaria combinadas, y 15 veces más que las asociadas a guerras y otras formas de violencia (Landigran et al., 2018); en ese sentido, la OMS ha declarado que una de cada nueve muertes en todo el mundo es atribuible a condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica.

Estos impactos no solo se registran en el contexto de países menos desarrollados, sino que también en el contexto de países desarrollados y, en muchos casos, en ciudades que intentan cumplir los estándares de calidad de aire orientados a resguardar la vida humana.

En el estudio de los impactos de la contaminación atmosférica que presentamos a continuación, afloran tres importantes dimensiones:

- El impacto que tiene la contaminación atmosférica sobre los niveles de mortalidad y morbilidad.
- En qué medida los impactos de la contaminación atmosférica son percibidos de manera diferenciada entre distintos sectores de la sociedad.
- Cómo ciertas condiciones humanas vuelven más sensibles a las personas a ser afectadas por la contaminación atmosférica.

¹ La Comisión Lancet sobre contaminación y salud aborda todos los costos sanitarios y económicos de la contaminación del aire, el agua y el suelo. A través de análisis de datos existentes y emergentes, la Comisión revela la contribución severa y no reportada de la contaminación a la Carga Global de Enfermedades. Ver <https://www.thelancet.com/commissions/pollution-and-health>

1 | Impactos en salud: Mortalidad y admisiones hospitalarias atribuibles a la contaminación por $MP_{2,5}$

Para evaluar el impacto en la salud de la población debido a la exposición de $MP_{2,5}$, se usó la metodología publicada en el estudio global de carga de enfermedad (GBD, 2019). En este caso se usó la información de exposición a contaminación por $MP_{2,5}$ a nivel de ciudad, excluyendo el territorio rural, puesto que los niveles de contaminación del aire no son comparables con la contaminación a nivel rural.

Para aplicar esta metodología se consideró: (a) la población expuesta al contaminante, (b) el número de eventos de salud ocurridos en un año y (c) la concentración promedio anual y diaria de $MP_{2,5}$. Adicionalmente, se aplicaron las funciones de dosis respuesta (FDR), que relacionan cada aumento de $MP_{2,5}$ con el aumento de riesgo en mortalidad (exposición crónica) o de admisiones hospitalarias (exposición aguda). Para este capítulo se utilizaron las FDR sugeridas por la OMS (WHO, 2013). Con esto, los eventos evitables fueron estimados respecto a: sobrepasar la norma nacional de exposición anual ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y sobrepasar la recomendación sugerida por la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tomando como base el año 2016 y considerando la información de 180 comunas del país, la población urbana total fue de 12.656.855, lo que representó mayoritariamente a las ciudades del centro y sur de Chile. En ese año ocurrieron 69.347 muertes por causas naturales, es decir, excluyendo las causadas por accidentes o crímenes; la tasa de mortalidad fue 5,5 por cada 1.000 habitantes.

De las muertes por causas naturales, se estimó que un promedio de 4.590 podrían evitarse anualmente si se cumpliera con la recomendación de la OMS; en tanto, si la comparación fuera respecto del estándar nacional, las muertes evitables serían, en promedio, 1.811. Si se tiene como referencia el Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente preparado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) con la información del año 2019 (MMA, 2019), las muertes prematuras por causas cardiopulmonares en mayores de 30 años, atribuibles a la contaminación promedio anual de MP_{2,5}, ascendieron a 3.640. Por el contrario, según nuestras estimaciones, un promedio de 2.564 muertes por estas causas se evitarían anualmente si se cumpliera el nivel de exposición crónica propuesto por la OMS.

En cuanto a morbilidad, las admisiones hospitalarias evitables por causas respiratorias en todas las edades, si no se hubiera sobrepasado la recomendación de la OMS de exposición de 24 horas (25 µg/m³), serían, en promedio, 3.007; por otra parte, si no se hubiera sobrepasado el estándar nacional (50 µg/m³), habrían sido 1.069. Para las admisiones hospitalarias por causas cardiovasculares, en el caso de la recomendación OMS, los eventos evitables hubieran sido 1.379; y para el estándar nacional, 562 (Figura 1).

Figura 1. Muertes y Hospitalizaciones evitables según este trabajo siguiendo recomendaciones OMS (izquierda) o el estándar nacional (derecha).



2 | Contaminación atmosférica en un contexto de desigualdad ambiental

Desde los años 80 existe evidencia que refleja una distribución desigual de problemas como el cambio climático y la contaminación atmosférica. Bajo el paradigma de la justicia ambiental se ha estudiado cómo el nivel socioeconómico, la pertenencia a minorías étnicas o raciales y la segregación residencial afectan la calidad ambiental de las personas (Brulle & Pellow, 2006).

De este modo, se ha observado que existen desigualdades en: (a) la exposición a contaminación ambiental o acceso a bienes ambientales, (b) el efecto que tienen las políticas y regulaciones ambientales, (c) el impacto que pueden ejercer las personas sobre el medioambiente, y (d) la participación en el diseño de políticas ambientales (Laurent, 2011).

Esto es relevante no solo por el derecho de las personas a vivir en un ambiente libre de contaminación (que atribuye un valor intrínseco a la distribución de la calidad ambiental), sino también por estar asociado a la igualdad de oportunidades, ya que la exposición a la contaminación afecta la trayectoria de vida de niños, niñas y adolescentes, determinando su futuro desempeño educacional y laboral. Asimismo, la distribución desigual de las cargas ambientales está relacionada con la equidad económica, pues la exposición a contaminantes afecta la productividad laboral, genera costos en la salud e impacta el valor de los bienes y propiedades (Boyce et al., 2016).

En el caso particular de Chile existen diversas evidencias sobre este problema. A continuación, se presenta un breve análisis descriptivo de la desigualdad ambiental en el país usando estimaciones de la concentración atmosférica de $MP_{2,5}$ para distintas comunas (entre las regiones de Coquimbo y Aysén).

Para entregar información sobre la distribución de los niveles de contaminación entre distintos grupos de la población, se realizó una comparación de deciles que permite observar las diferencias en la media de MP_{2,5}. Las variables que se usaron para agrupar a las comunas son: (a) el ingreso per cápita medio del hogar; (b) pobreza por ingresos; (c) pobreza multidimensional; (d) media de años de escolaridad; (e) proporción de personas que pertenecen a algún pueblo originario; y (f) proporción de personas migrantes. Dado que los niveles de contaminación son mayores en contextos urbanos, al igual que algunas de las variables categorizadas, se controló el análisis por la proporción de población urbana en la comuna.

En el caso de los ingresos per cápita y la pobreza por ingresos, no se encuentran diferencias significativas en la concentración de MP_{2,5} entre quienes están ubicados en el primer y último decil. Sin embargo, al separar por deciles de pobreza multidimensional, se ve que las comunas con mayor pobreza multidimensional están expuestas a 4,7 µg/m³ más que aquellas con menores niveles de pobreza multidimensional². En el caso de la escolaridad, nuevamente no se observan diferencias entre el primer y el último decil.

Al comparar las comunas con mayor y menor proporción de población originaria, se observa que aquellas que están en el 10 % superior están expuestas a 4,7 µg/m³ más de MP_{2,5} que las que tienen menores niveles de población perteneciente a algún pueblo originario. Finalmente, al comparar según la proporción de población migrante, se puede ver que las comunas del decil con mayor proporción de personas migrantes están expuestas a 9,3 µg/m³ más de MP_{2,5}, respecto a las del decil con menor cantidad.

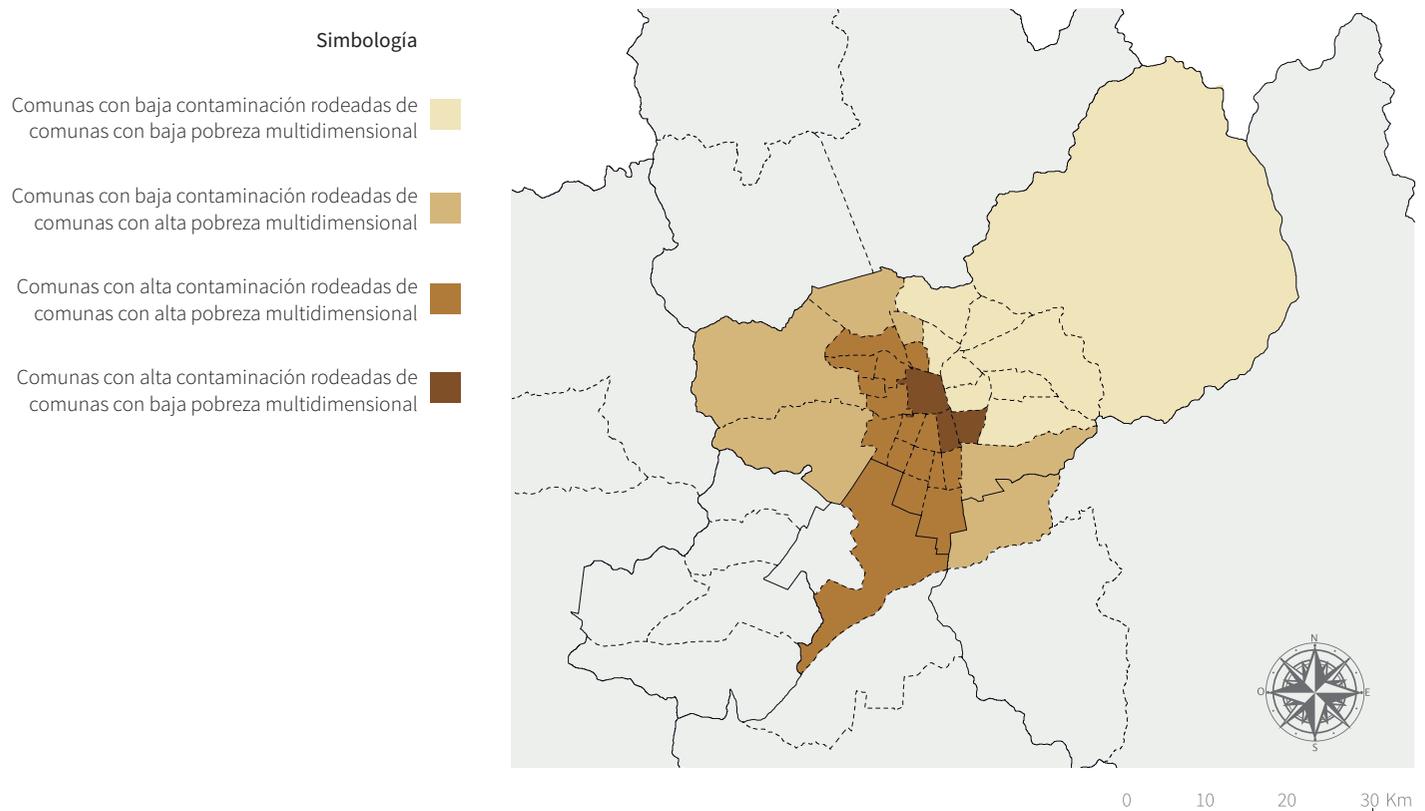
² Según la Guía de calidad del aire de la OMS, el estándar es de 10 µg/m³ para la media anual relativa a material particulado.

Estos resultados muestran que, a nivel nacional y controlando por el nivel de población urbana, la contaminación por MP_{2,5} se distribuye desigualmente, afectando especialmente a las comunas más pobres (multidimensionalmente), y a las que cuentan con mayor población indígena y migrante.

Si miramos de cerca la relación entre pobreza multidimensional de las comunas y MP_{2,5}, tomando como ejemplo la Región Metropolitana, podemos verificar cómo esta relación varía a través del espacio geográfico, sobre todo por la condición de pobreza de

comunas adyacentes. Así, la Figura 2 muestra cómo el nivel de contaminación en una comuna está relacionado con el nivel de pobreza de las comunas aledañas, permitiendo observar la existencia de un grupo de comunas con poca contaminación rodeadas de comunas con poca pobreza en la zona oriente, y otro grupo de comunas con alta contaminación rodeadas de comunas con alta pobreza en la zona sur-poniente. Este resultado muestra que, además de la distribución desigual de la contaminación atmosférica, existe una forma de segregación de la calidad ambiental que también tiene relación con otros patrones de desigualdad.

Figura 2. Mapa de patrones espaciales de pobreza multidimensional y contaminación atmosférica para las comunas del Gran Santiago



3

La contaminación atmosférica tiene un impacto diferenciado en la población

Todos los seres humanos somos vulnerables, en mayor o menor medida, a algún tipo de amenaza ambiental, pero lo que diferencia a cada individuo es el grado de exposición, sensibilidad -entendida como la susceptibilidad a ser afectado- y capacidad para enfrentar peligros y mitigarlos. Para el presente informe, la sensibilidad comunal a la contaminación atmosférica se obtuvo para 324 comunas³, a partir de tres factores: edad, salud y pobreza (Figura 3) siguiendo la metodología sugerida por Araya-Muñoz et al. (2017).

La Figura 3 muestra que, en términos de edad, los porcentajes comunales en lo que respecta a proporción de población menor de 5 años se encuentran entre 0,8 % y 9,7 %, y corresponden a las comunas de Río Verde (Región de Magallanes y Antártica Chilena) y Alto Hospicio (Región de Tarapacá), respectivamente. En tanto, la comuna de Navidad (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins) es la que registra la proporción más alta de población mayor de 65 años con un valor de 21,3%. Ninguna comuna en Chile se encuentra en la categoría "comuna joven" (33 % de su población entre 0 y 14 años, y menos del 5 % de su población mayor a 65 años) de acuerdo con los criterios definidos por las Naciones Unidas en cuanto a envejecimiento poblacional (CEPAL, 2004); en cambio, 288 comunas se encuentran en la categoría "envejecida" (menos del 25% de su población entre 0 y 14 años y más del 10% de su población mayor a 65 años). En lo que respecta a salud, de acuerdo con los datos de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN), hipertensión arterial y diabetes corresponden a las enfermedades crónicas que registran los mayores porcentajes, con 10 % y 5 % como promedio nacional, respectivamente. En cuanto a pobreza multidimensional, los porcentajes comunales varían entre 0,6 % y 67,2 % y corresponden a las comunas de Timaukel (Región de Magallanes y Antártica Chilena) y General Lagos (Región de Arica y Parinacota).

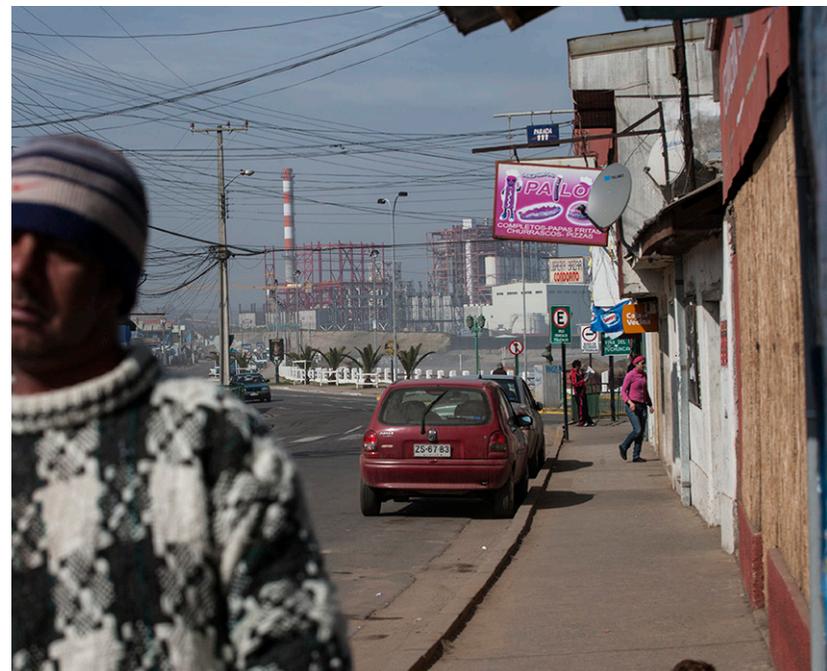
³ Se excluyen 22 comunas que no contaban con datos de salud y pobreza.

Figura 3. Factores e índices incluidos en el indicador global de sensibilidad.



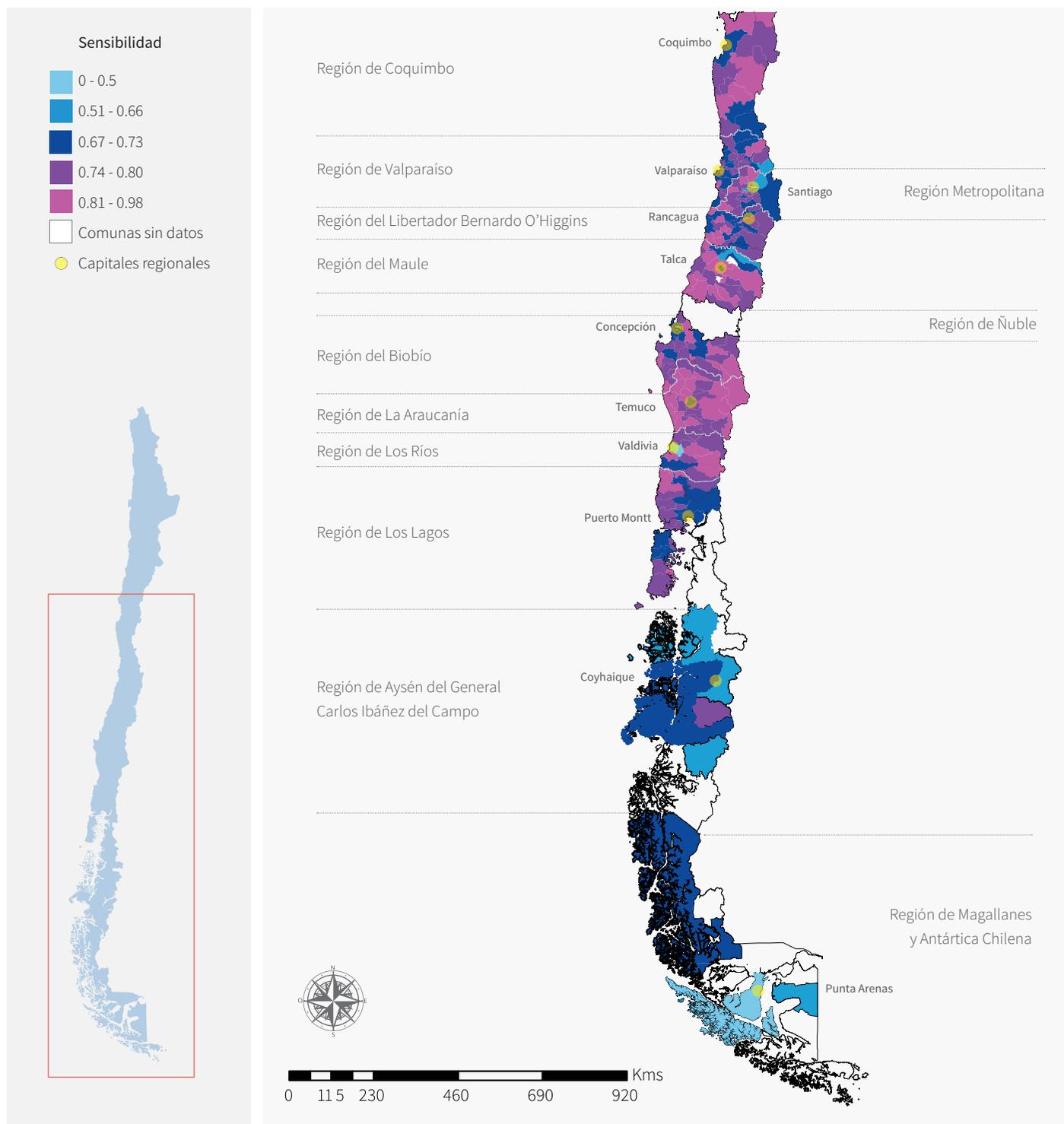
Nota: todos los valores de las series de datos corresponden a porcentajes comunales.

Los valores del índice global de sensibilidad a la contaminación atmosférica, tomando en cuenta edad, salud y pobreza, se extienden entre 0 y 0,99, con un promedio de 0,76 considerando las 324 comunas del país. Solo la comuna de Camiña, Región de Tarapacá, posee valor 0, lo que podría explicarse porque el porcentaje de población que declara problemas de salud tiende a 0, pese a poseer un valor de pobreza multidimensional de 0,77. Luego, se salta hasta el valor 0,45 de sensibilidad en la comuna de Santiago Centro. La mayoría de los datos se encuentran sobre 0,6, que podrían interpretarse como valores altos de sensibilidad. Especialmente, los valores más altos de sensibilidad a la contaminación se ubican en el centro y sur de Chile, coincidiendo con la zona más poblada del país. No se observan diferencias significativas en relación con la posición costera, interior o cordillerana de las comunas (ver Figura 4).



⁴ “Durante los últimos 12 meses ¿ha estado en tratamiento médico por...?”

Figura 4. Mapa de índice de sensibilidad comunal a la contaminación atmosférica

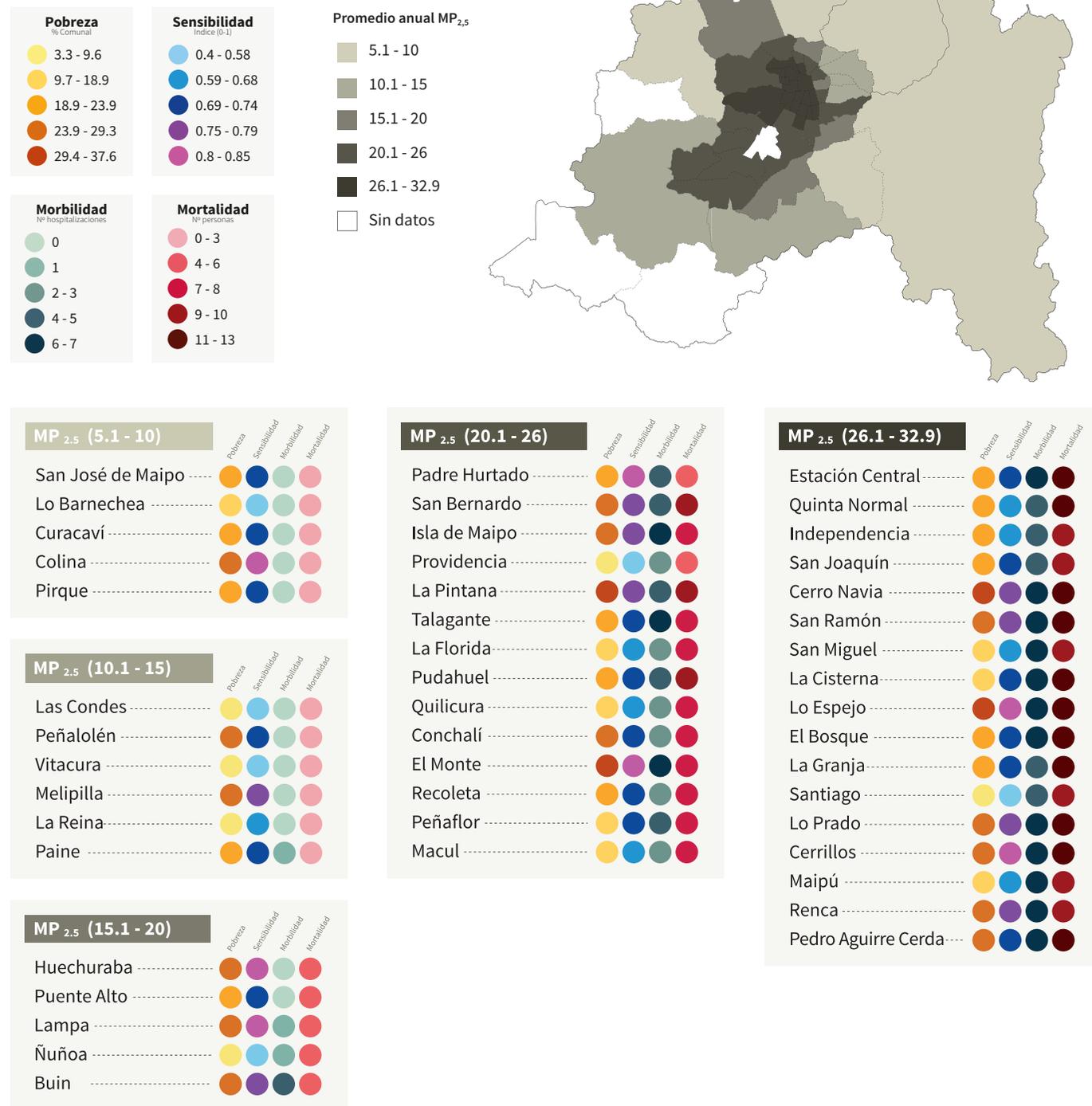




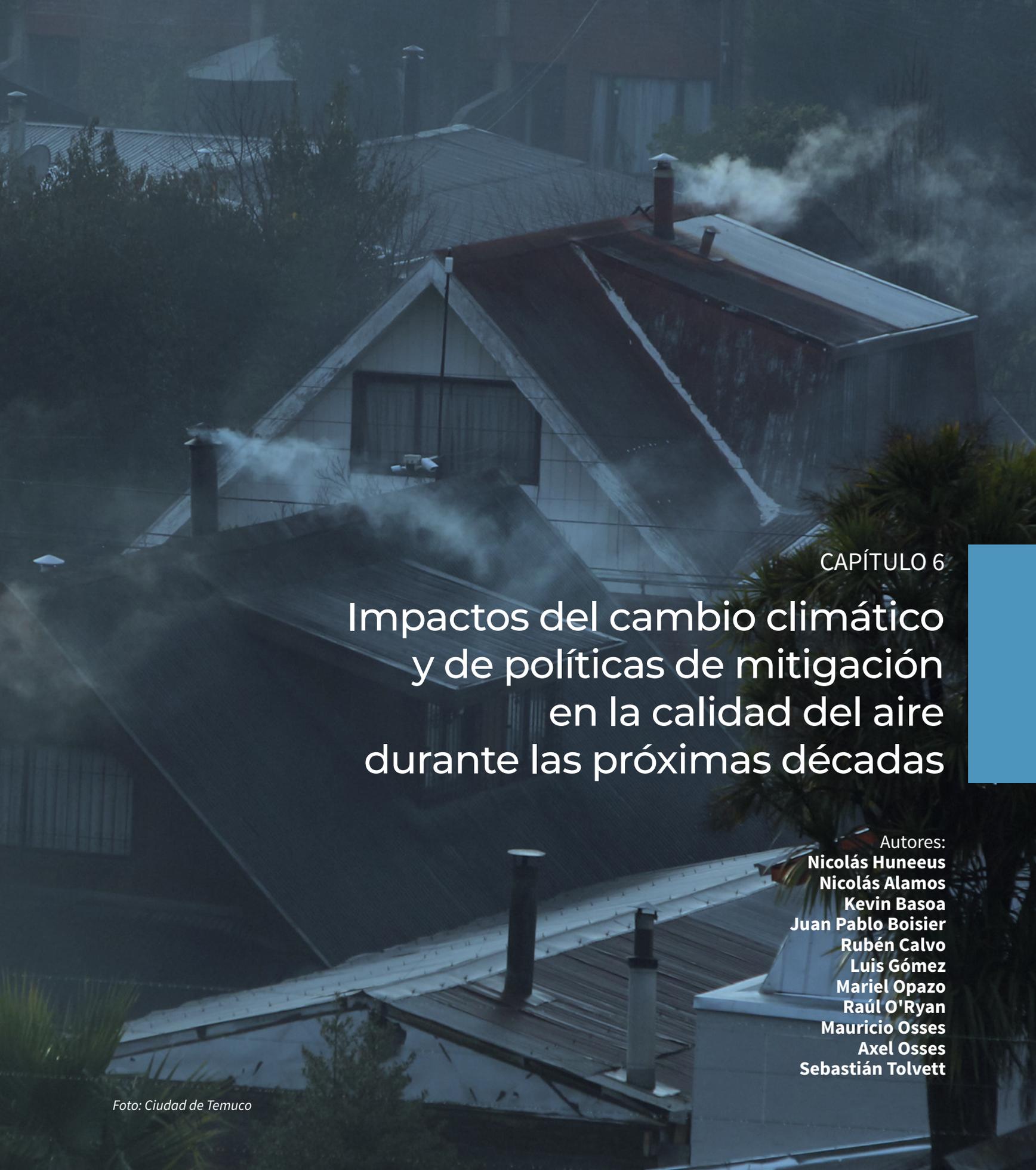
El Gran Santiago reúne a 45 comunas de nuestro país y a un 40 % de la población, siendo, por tanto, el núcleo urbano más importante de Chile. La Figura 5 muestra la relación que existe entre la contaminación atmosférica y las dimensiones analizadas en este capítulo (mortalidad, morbilidad en términos de número de hospitalizaciones cardiorrespiratorias, pobreza multidimensional y sensibilidad a la contaminación atmosférica) para el caso del Gran Santiago. En específico, la Figura 5 muestra la morbilidad atribuible a contaminación por $MP_{2,5}$, y que las admisiones hospitalarias cardiorrespiratorias atribuibles a la contaminación son mayores en las comunas del sur-poniente; una situación similar se observa con la mortalidad atribuible, que refleja el análisis de la relación entre las distribuciones de $MP_{2,5}$ y pobreza multidimensional en la ciudad de Santiago. En cuanto a la relación entre sensibilidad a la contaminación y concentración de $MP_{2,5}$, la Figura 5 también muestra la correspondencia que existe entre comunas donde se supera el umbral promedio anual propuesto por la OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y valores de sensibilidad iguales o superiores a 0,7, que, en general, se encuentran ubicadas en el sector pericentral norte, nor-poniente y poniente de la ciudad.

Finalmente, se pueden observar patrones que debieran estudiarse de forma más detallada, pues dan cuenta de cómo la contaminación atmosférica se correlaciona con las dimensiones analizadas en este capítulo. Políticas públicas efectivas y eficientes que aborden el tema de la contaminación atmosférica requieren mirar de cerca y tomar en cuenta las condiciones socioculturales asociadas al fenómeno e identificar elementos que permitan mejorar las políticas públicas y, en general, la acción política.

Figura 5. Relación entre contaminación atmosférica (concentración de MP_{2,5}) y pobreza, índice de sensibilidad, morbilidad y mortalidad, respectivamente, para el caso del Gran Santiago.



Infografía: Francisca Pedreros Morales



CAPÍTULO 6

Impactos del cambio climático y de políticas de mitigación en la calidad del aire durante las próximas décadas

Autores:

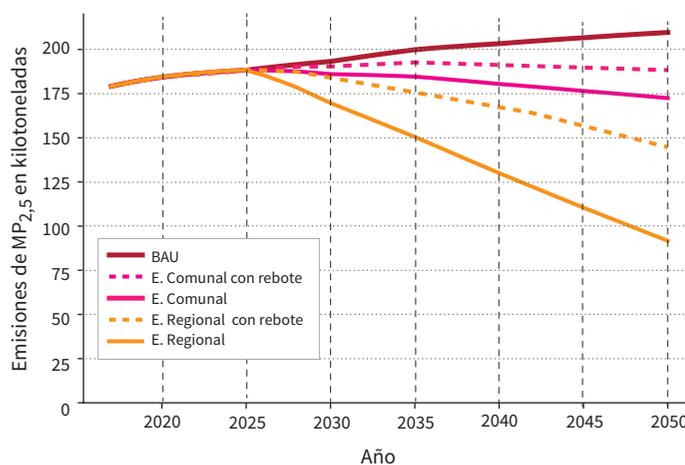
Nicolás Huneus
Nicolás Alamos
Kevin Basoa
Juan Pablo Boisier
Rubén Calvo
Luis Gómez
Mariel Opazo
Raúl O'Ryan
Mauricio Osses
Axel Osses
Sebastián Tolvett

1 | Escenarios de emisiones de contaminantes criterio para el sector residencial

Para estudiar el impacto de distintas políticas de mitigación de emisiones residenciales en la calidad del aire, se generó un modelo que estima estas emisiones sobre la base de una serie de parámetros sociodemográficos, tales como el crecimiento de la población, el ingreso promedio disponible, porcentaje de urbanización y el tamaño del hogar. Este modelo toma como base el inventario descrito en el Capítulo 2 y, a partir de este, se diseñaron tres escenarios de política pública para el periodo 2017-2050.

El escenario de **Política Actual**, también conocido como *Business as usual* (BAU), plantea un aumento del número de viviendas bajo las condiciones sociotécnicas actuales, es decir, donde la leña sigue siendo el combustible más asequible para los hogares y las políticas públicas no logran revertir esta tendencia a partir de subsidios. Bajo este supuesto, la cantidad de viviendas que consumen leña aumentaría en un 11 % en las regiones del centro y sur durante el periodo 2017-2050, y con ello también las emisiones de $MP_{2,5}$ en un 16 % respecto al año inicial (Figura 1a).

Figura 1. Trayectoria de emisiones residenciales $MP_{2,5}$ bajo escenarios BAU, Comunal y Regional con y sin efecto rebote (2017-2050). Para efecto rebote véase Box: Pobreza energética como barrera para la transición energética.

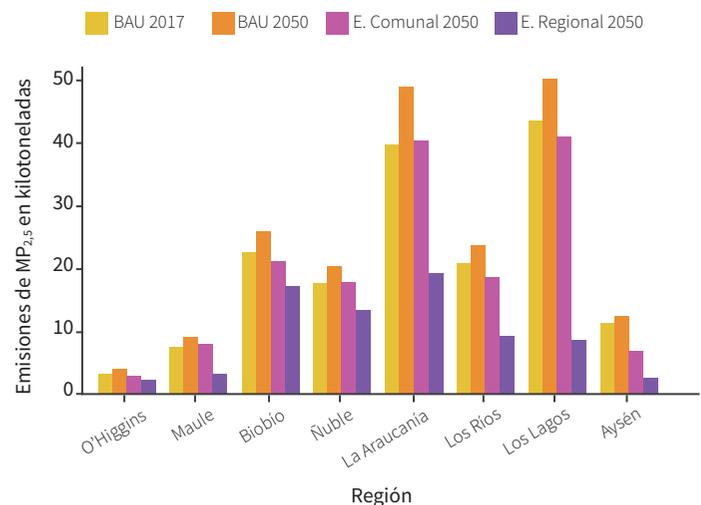


El escenario **Comunal** considera que el mejoramiento de la aislación térmica y el recambio de calefactores comprometidos en los PDA actualmente vigentes se mantienen hasta el año 2050 solo en las comunas hoy adscritas a esta política pública¹. Esto implicaría mantener cerca de 17.000 subsidios para el mejoramiento de viviendas y 13.000 recambios de calefactores de leña a pellet de madera al año, aproximadamente. Bajo este supuesto, las emisiones de MP_{2,5} en el total de la zona centro y sur disminuirían en un 3 % respecto al año 2017, mientras que, en las comunas con PDA, las emisiones de MP_{2,5} se reducirían en promedio un 43 %, y en las comunas sin PDA aumentarían un 17 % en promedio (Figura 2).

Por último, el escenario **Regional** plantea medidas de calidad del aire a todas las comunas de las regiones del centro y sur², a un ritmo anual cercano a los 22.000 subsidios para el mejoramiento de viviendas y, aproximadamente, 35.000 recambios de calefactores de leña a pellet de madera hasta el año 2050. Con estas medidas, las emisiones de MP_{2,5} se reducirían un 48 % en el centro y sur, especialmente en comunas de las regiones de Los Lagos y Aysén, donde sus emisiones totales se reducen entre un 77 % y un 79 %, respectivamente, en comparación con los niveles del año 2017 (Figura 2).

De estas estimaciones se desprende que, tanto para mejorar la calidad del aire en ciudades actualmente reconocidas por los PDA, como para evitar el aumento de emisiones de material particulado en comunas en crecimiento, se requiere ampliar el alcance de las políticas de calidad del aire a la mayoría de las localidades del centro y sur de Chile. Sin embargo, la eficiencia de estas acciones depende fuertemente del efecto rebote asociado a cada medida, por lo que no considerar este fenómeno puede reducir el impacto de las medidas implementadas y, potencialmente, dificultar el cumplimiento de las metas fijadas (ver Box: Pobreza energética como barrera para la transición energética).

Figura 2. Emisiones residenciales MP_{2,5} por región para el año 2017, bajo escenario BAU, y el año 2050 bajo escenarios BAU, Comunal y Regional.



¹ Este escenario se implementa en las comunas de Coinco, Rengo, Rancagua, Requinoa, Graneros, Machalí, San Vicente, Quinta de Tilcoco, Chimbarongo, Mostazal, Pichidegua, Doñihue, Olivar, Coltauco, Codegua, Malloa, San Fernando, Talca, Curicó, San Pedro de la Paz, Concepción, Hualpén, Penco, Coronel, Los Ángeles, Talcahuano, Chillán Viejo, Tomé, Lota, Chillán, Hualqui, Padre Las Casas, Temuco, Osorno, Coyhaique y Valdivia. El total de población es de 3.133.268 (CENSO 2017).

² Este escenario se implementa en todas las comunas de las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Lagos, Los Ríos y Aysén. El total de población es de 5.790.237 (CENSO 2017).

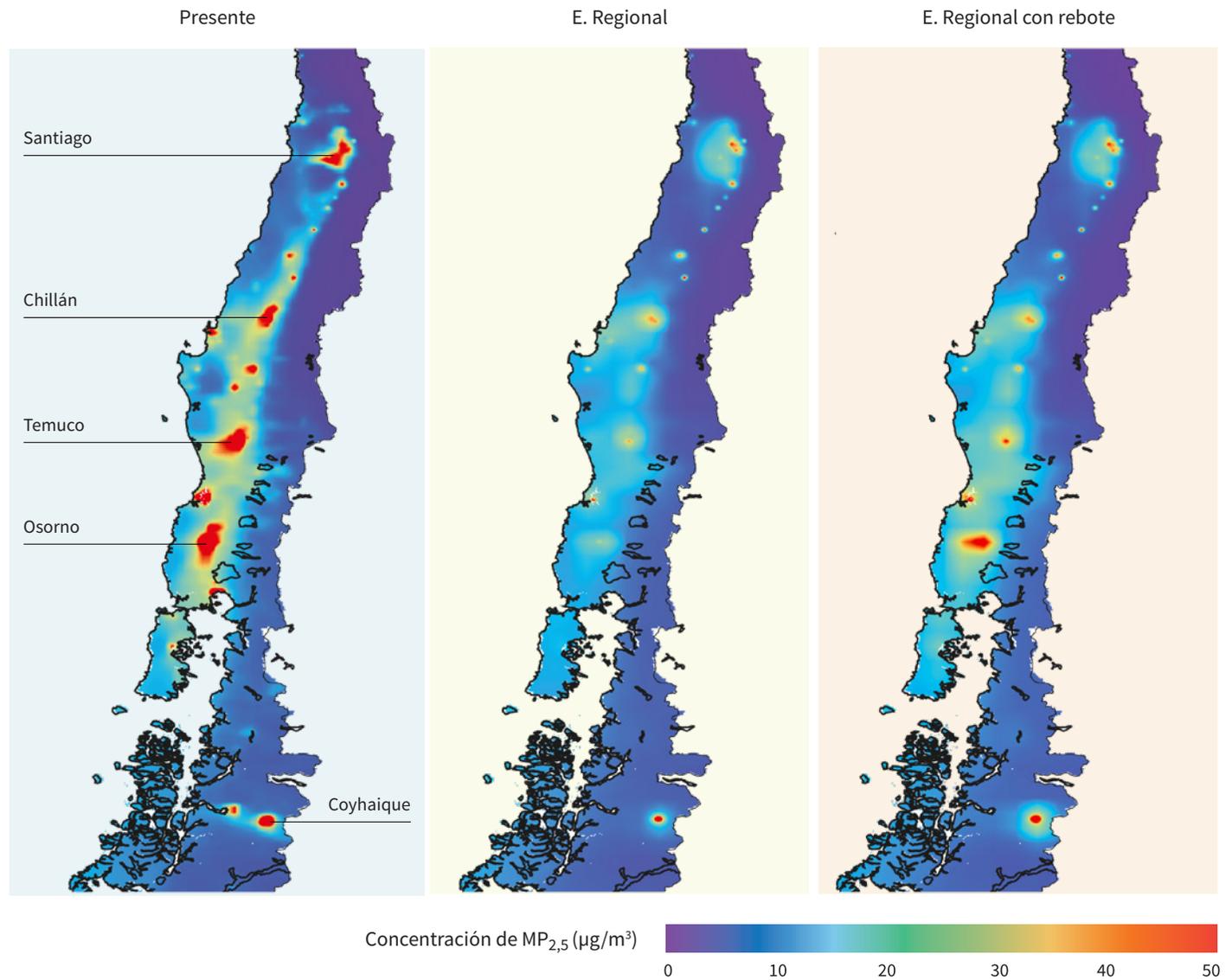
2 | Reducción de emisiones residenciales y su impacto en la calidad del aire

Para estimar el impacto en la calidad del aire de los escenarios de emisiones presentados en la sección anterior, se simuló mediante el modelo de meteorología y química atmosférica WRF-CHIMERE (Mazzeo et al., 2018) la dispersión de contaminantes en la zona centro y sur de Chile. Para tal efecto y utilizando siempre la misma meteorología de los meses de invierno de los años 2015 a 2017, se calculó la calidad de aire asociada a las emisiones presente (ver Capítulo 2) y los escenarios (futuro) de la sección anterior. La diferencia entre la calidad del aire presente y la de los escenarios (futuro) permite examinar el impacto de las medidas de mitigación descritas en la sección anterior, si se implementaran hoy. Así, los resultados dan la posibilidad de evaluar la eficiencia de las medidas incluidas en los escenarios y su efecto en mejorar la calidad del aire. El sistema de modelación usado para este fin ha sido aplicado anteriormente con éxito para caracterizar la dispersión de la contaminación en Santiago y permite conocer la evolución de la calidad del aire en lugares donde no hay estaciones de monitoreo (Mazzeo et al., 2018).

La mayor reducción en la contaminación por $MP_{2,5}$ se obtiene para el escenario donde las políticas de recambio de calefactores de leña a pellet y mejoramiento de la aislación térmica de las viviendas se aplican a nivel regional (Figura 3). Bajo este escenario, las concentraciones de $MP_{2,5}$ durante el periodo invernal se reducen entre un 21 % en Santiago y un 78 % en Osorno. Sin embargo, cuando se incluye el efecto rebote en los escenarios (ver Box: “Pobreza energética como barrera para la transición energética”), el impacto de la medida es menor y la reducción de la concentración de $MP_{2,5}$ es de solo un 56 % en Osorno, mientras que en Santiago el efecto se mantiene constante dada la ausencia de efecto rebote en la capital.

Padre Las Casas - Temuco

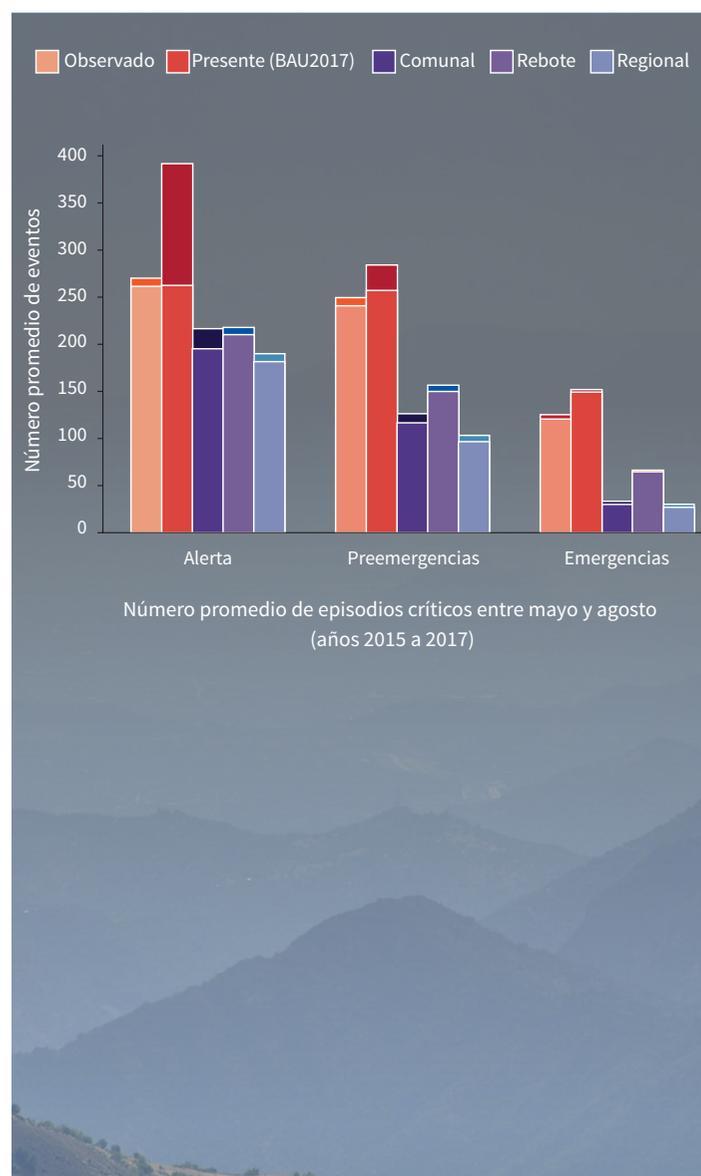
Figura 3. Concentración media de $MP_{2,5}$ en invierno para el periodo 2015-2017, calculados a partir de emisiones **presente** (ver Capítulo 2) y en base a las proyecciones para el año 2050, según los escenarios **Regional** y **Regional con rebote**.



La simulación logra, en general, reproducir el número promedio de eventos críticos ocurridos a nivel nacional en el periodo 2015-2017, teniendo mayor éxito para los episodios de Alerta y Preemergencia (Figura 4). Asimismo, los resultados indican que las medidas incluidas en los escenarios son eficaces en reducir la ocurrencia de episodios durante el periodo de Gestión de Episodios Críticos (GEC), obteniéndose una reducción de casos de Alerta, una disminución mayor de Preemergencias y un descenso aún más importante de Emergencias. Esta variación diferenciada para las distintas categorías de episodios es el resultado de un efecto cascada, donde, ante una reducción de las concentraciones, una Emergencia pasa a ser una Preemergencia, y una Preemergencia a Alerta. Sin embargo, y aunque las medidas de descontaminación reducen el número total de los eventos críticos, ninguno de los escenarios proyectados logra eliminar la ocurrencia de Emergencias o Preemergencias.

Los resultados sugieren también que, a pesar de la implementación de las medidas antes descritas, en ciudades como Temuco, Valdivia, Santiago, Osorno y Coyhaique seguirán ocurriendo eventos críticos (Emergencia, Preemergencia y Alertas). Destacamos que, si bien el sistema de monitoreo es eficiente en reproducir la mayoría de los eventos críticos que ocurren en el país, existen ciudades donde ocurren eventos que, actualmente, no cuentan con un periodo de GEC.

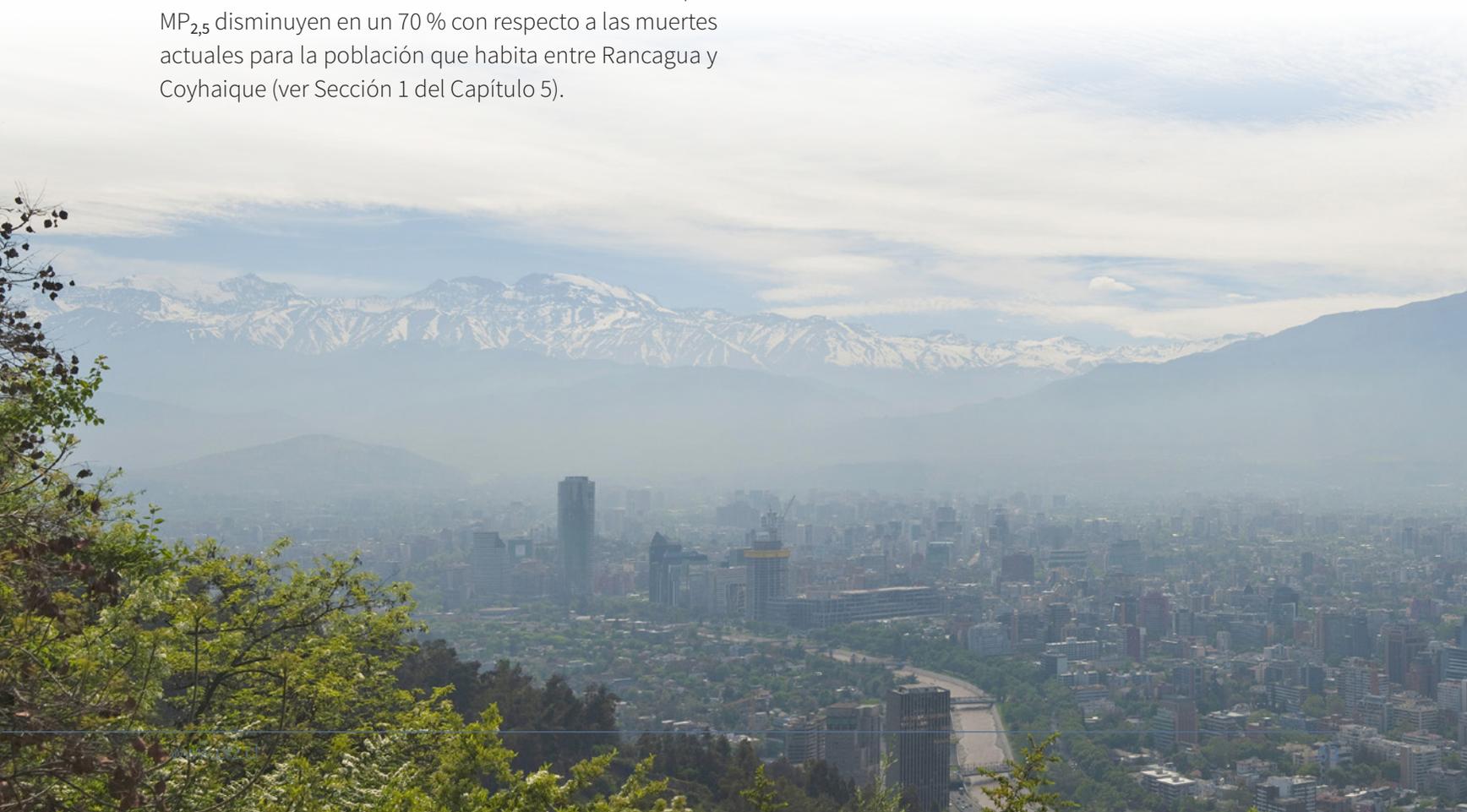
Figura 4. Número promedio de eventos de Alerta, Preemergencias y Emergencias a nivel nacional para los meses de mayo a agosto, de los años 2015 a 2017, según las observaciones de la red SINCA (primera columna) y el escenario presente (segunda columna). Se incluye también el número de eventos que ocurrirían si se hubieran implementado todas las medidas del Escenario Comunal (tercera columna), Regional con rebote (cuarta columna) y Regional (última columna). La parte inferior de cada columna muestra los episodios para ciudades con GEC y la parte superior aquellas sin GEC.



En la actualidad, para aproximadamente un 96 % de los días de invierno, al menos una ciudad en Chile presenta un episodio de Alerta por $MP_{2,5}$. En tanto, para Preemergencias y Emergencias, el número de días es alrededor de un 91 % y 57 %, respectivamente. Las simulaciones numéricas sugieren que, bajo el escenario más ambicioso (Escenario Regional), los números se reducen aproximadamente a un 81 %, 54 % y 19 % para Alertas, Preemergencias y Emergencias, respectivamente. Los resultados también sugieren que ciudades como Santiago, Rancagua, San Fernando, Linares, Chillán, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno y Coyhaique, que actualmente no cumplen la norma primaria de 24 hrs. para $MP_{2,5}$ diario, seguirán sin cumplirla si se aplicase hoy la reducción de emisiones residenciales por leña del Escenario Regional proyectadas para el año 2050. Adicionalmente, bajo ese escenario, las muertes a causa de la contaminación por $MP_{2,5}$ disminuyen en un 70 % con respecto a las muertes actuales para la población que habita entre Rancagua y Coyhaique (ver Sección 1 del Capítulo 5).

Lo expresado anteriormente revela que se necesita una mayor mitigación de las emisiones que las contempladas en los PDA vigentes para poder lograr la meta establecida en dichos planes, alcanzar los niveles señalados en la norma primaria y mejorar, efectivamente, la calidad del aire.

Hacemos notar que este análisis no incluye el efecto del cambio climático en la calidad del aire. Cambios en aspectos como la precipitación, la temperatura ambiente, patrones de circulación y/o estabilidad atmosférica (ver Sección 3) pueden tener impactos en la eficiencia de las políticas que se implementen y deben ser considerados en el diseño de futuras políticas de largo alcance.



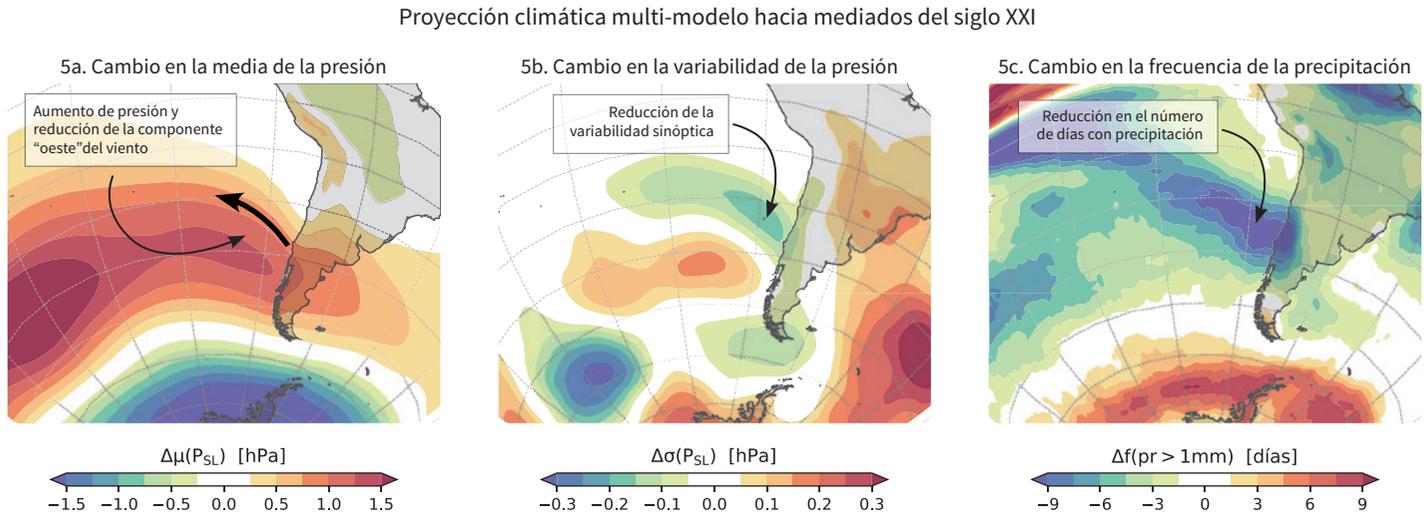
3

Cambio climático y su potencial impacto en la calidad del aire

La evolución de la calidad de aire en Chile estará condicionada, en gran parte, a las medidas de mitigación. Sin embargo, la dispersión, remoción y transformación de partículas depende de condiciones atmosféricas (ver sección en 2 del Capítulo), por lo que el cambio climático también puede afectar la contaminación en ciudades. En contraste con las emisiones, sujetas a políticas nacionales, el cambio climático se manifiesta en Chile como resultado, principalmente, por perturbaciones de escala global. A continuación, se discute el potencial efecto del cambio climático en la contaminación por $MP_{2,5}$ en el centro y sur del país, sin considerar escenarios de cambio en las fuentes de emisiones locales.

En un escenario de crecimiento sostenido en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (RCP8.5; Moss et al., 2010), las proyecciones para mediados del siglo XXI de múltiples modelos globales de clima indican patrones claros de cambio en la circulación y en el clima del Pacífico Sur (Figura 5). Pese a la robustez de estas perturbaciones de gran escala, no es evidente inferir *a priori* su impacto en la calidad del aire en el país. Por un lado, los cambios en la circulación prevén una disminución del viento oeste sobre el centro y sur de Chile continental (Figura 5a), condición que favorece la estabilidad atmosférica y disminuye la ventilación en los valles del país (ver Capítulo 2). Por otro lado, el aumento en la estabilidad atmosférica conlleva una reducción en la variabilidad meteorológica (sinóptica), que, contrariamente a la hipótesis anterior, podría limitar la frecuencia de casos extremos de alta contaminación (Figura 5b). Asimismo, otros factores de cambio climático podrían afectar la calidad del aire en un sentido u otro; en particular, la disminución en la frecuencia de días con precipitación (Figura 5c) puede mermar la remoción de partículas en el sur del país.

Figura 5. Cambios para el periodo 2035-2065 respecto del periodo base 1970-2000, proyectados con doce modelos globales de clima, parte del proyecto CMIP5 (Taylor et al., 2012), bajo un escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). Se indican cambios para el semestre de invierno (abril-septiembre) en: (5a) la media de la presión a nivel del mar, (5b) la desviación estándar (interdiaria) de la presión a nivel del mar y (5c) el número de días con precipitación mayor a 1 mm.



Para estimar de forma cuantitativa el efecto del cambio climático en la calidad del aire, se derivaron modelos empíricos para la altura de la capa de mezcla en el centro y sur de Chile, y también para la concentración local de $MP_{2,5}$ en Santiago y Temuco. Estos modelos empíricos dependen de condiciones de circulación de gran escala, lo que permitió generar proyecciones futuras de ambas variables con información de doce modelos globales de clima CMIP5.

Los resultados indican un patrón de cambio distintivo, caracterizado por un aumento en la frecuencia de días de invierno con una capa de mezcla confinada en el centro y sur de Chile (Figura 6a). Esta proyección, desfavorable a la dispersión de contaminantes, afecta principalmente a las regiones del Biobío y de La Araucanía. En otras regiones, se proyecta un impacto de menor magnitud e incluso cambios favorables a una mayor ventilación atmosférica en la zona centro y norte del país. De acuerdo con este patrón espacial de

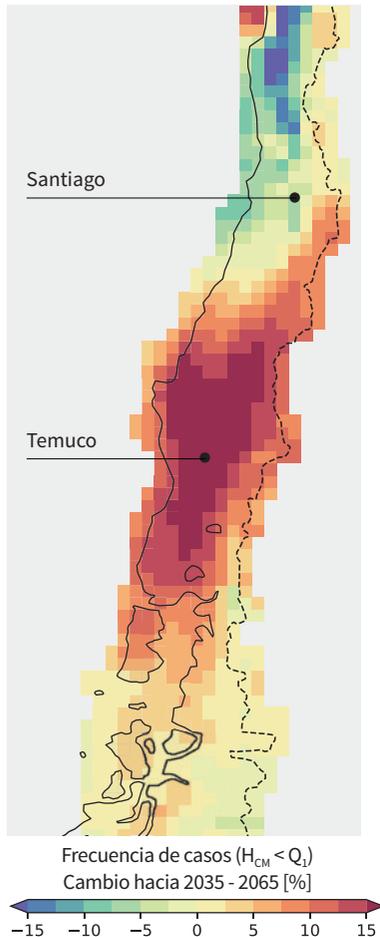
cambios en la altura de la capa de mezcla, la proyección es incierta en Santiago, con una disminución media leve de casos de capa de mezcla confinada dentro de un rango de incertidumbre elevado (Figura 6b). En cambio, en Temuco se prevé un aumento en torno a un 20 % (5-35 %) en el número de días de invierno con baja ventilación atmosférica para la década de 2050 (Figura 6c). Los modelos de concentración de $MP_{2,5}$ prevén una evolución coherente con las proyecciones de altura de la capa de mezcla, con un escenario incierto en Santiago y condiciones desfavorables para la calidad del aire en Temuco (Figura 6b y 6c).

La incertidumbre en las proyecciones descritas responde, en parte, a la superposición de variaciones naturales con una señal de cambio climático antropogénico, así como a distintas sensibilidades climáticas en los modelos globales al aumento de GEI y a otros factores antrópicos de cambio.

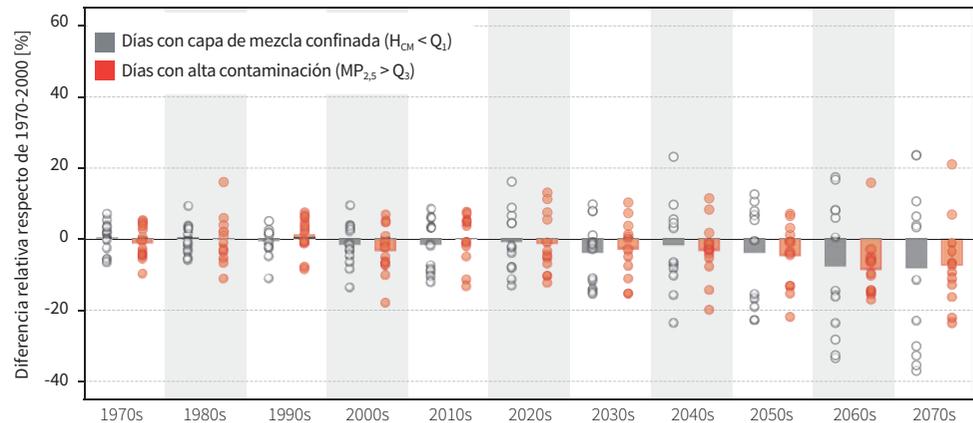
Figura 6. (6a) Cambios en la frecuencia de días de invierno (abril-septiembre) con una capa de mezcla superficial baja (altura dentro del 1^{er} cuartil de la distribución) para el periodo 2035-2065, respecto de 1970-2000, en un escenario de altas emisiones de GEI (RCP8.5). Proyección realizada en base a modelos estadísticos de altura de la capa de mezcla, forzados por cambios en la presión a nivel del mar de doce modelos de clima global. Paneles (6b) y (6c) indican cambios por década en la frecuencia de casos con capa de mezcla confinada en Santiago y Temuco, respectivamente (barras grises). Mediante una metodología similar, se proyectan cambios en la frecuencia de episodios de alta concentración de MP_{2,5} en estas ciudades (sobre el cuartil superior, en rojo). Círculos y barras indican los resultados de modelos individuales y el promedio multi-modelo, respectivamente. Fuente de datos: Reanálisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio ERA5 (altura de capa de mezcla,, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), observaciones de MP_{2,5} de la red SINCA (<https://sinca.mma.gob.cl>) y simulaciones climáticas del proyecto CMIP5 (Taylor et al., 2012).

Proyección multi-modelo en la frecuencia de eventos de baja ventilación atmosférica y de alta concentración de MP_{2,5} durante el invierno (abril - septiembre)

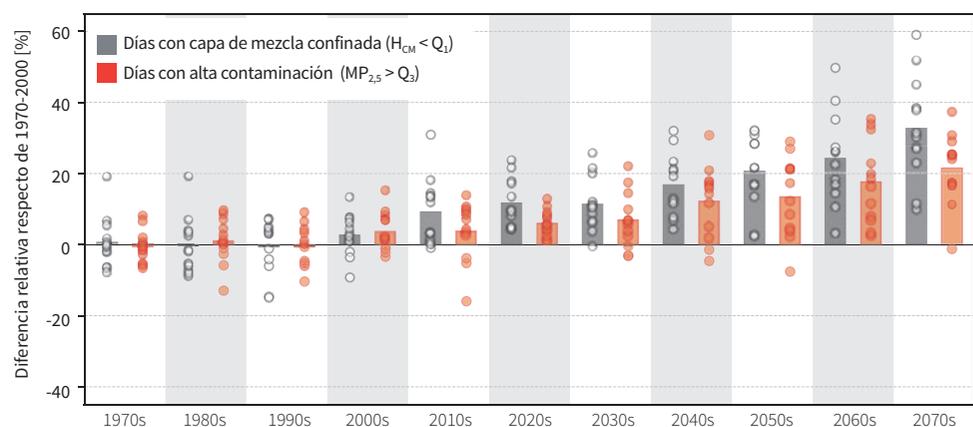
6a. Capa de mezcla confinada



6b. Cambios por década en Santiago



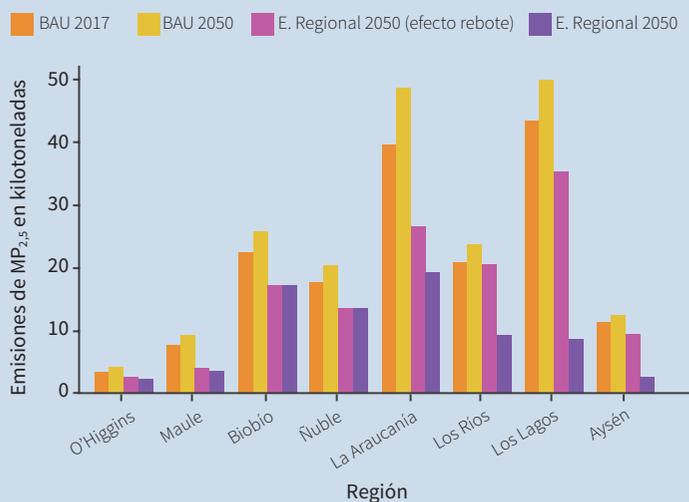
6c. Cambios por década en Temuco



Pobreza energética como barrera para la transición energética.

La efectividad de las medidas de mitigación de las emisiones residenciales se encuentra limitada por las condiciones preexistentes de pobreza energética de los hogares del centro y sur de Chile (RedPE, 2019; Reyes et al., 2019). En este sentido, se estiman dos efectos rebote en las medidas de los escenarios desarrollados: (a) una menor efectividad de las medidas de aislación térmica que la proyectada y (b) la restricción presupuestaria por el cambio a combustibles más caros. Por un lado, se considera que, acorde a la investigación científica, el mejoramiento de aislación térmica tiene una efectividad de un 60 % de lo esperado debido a condiciones preexistentes de temperatura bajo el nivel de confort térmico (Galvin, 2014; Galvin et al., 2016). Por otro lado, dado que el pellet de madera es un combustible más eficiente, pero más costoso que la leña (Reyes et al., 2019), los hogares, sin aportes compensatorios, verán reducidos sus presupuestos familiares, complejizando la transición de leña a pellet, aumentando la resistencia frente al cambio o el retorno a tecnologías más contaminantes. La Figura 7 expone los resultados de emisiones de $MP_{2,5}$ considerando los dos efectos rebote sobre el escenario Regional.

Figura 7. Emisiones residenciales $MP_{2,5}$ por región para el año 2017, bajo escenario BAU, y el año 2050 bajo escenarios BAU y Regional con y sin rebote.



El impacto combinado de estos dos efectos rebote es diferenciado según la región del país. Por ejemplo, en las regiones del Biobío y de Ñuble, donde el uso de leña es ineficiente y se posee una demanda energética menor comparada con regiones de más al sur de Chile, el pellet de madera es una alternativa costo-efectiva conveniente para los hogares, observándose un efecto rebote menor al 1 %. Sin embargo, en regiones como Los Ríos, Los Lagos y Aysén, el efecto rebote es mayor, con un 19 %, 24 % y 25 % menor de reducción de emisiones respecto al escenario sin efecto rebote, respectivamente. Esto debido al eventual mayor gasto en energía de parte de los hogares al cambiarse a pellet de madera, lo que produciría mayor resistencia al cambio o el retorno a la leña como fuente energética de calefacción. En estas últimas tres regiones, la transición energética a pellet de madera contribuye en un 70 % al efecto rebote, mientras que la eficiencia energética de viviendas con el 30 % restante. Si bien el recambio de calefactores reduce en mayor medida las emisiones de $MP_{2,5}$, es una medida con mayor riesgo de implementación al producir mayor presión sobre el presupuesto familiar.

Para asegurar la efectividad de las medidas de control de calidad del aire y evitar efectos rebote, deben tomarse acciones anticipatorias, tales como mejorar el estándar nacional de aislación térmica de viviendas para reducir la demanda energética y aumentar el confort térmico, difundir prácticas de eficiencia energética y entregar subsidios económicos para amortiguar esta posible presión en los presupuestos familiares, entre otras. Conocer las condiciones de pobreza energética preexistentes en los hogares chilenos permitirá cuantificar mejor la incertidumbre asociada a este fenómeno y complementar el diseño de los actuales Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica.

BOX

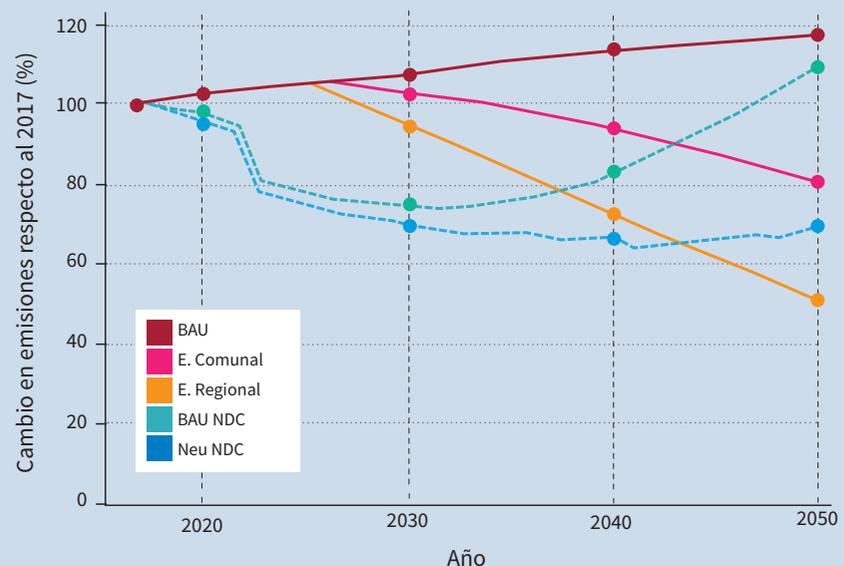
Proyección carbono negro

Las proyecciones de emisiones presentadas en la Sección 1 de este capítulo también permiten estimar el impacto de estas medidas en las emisiones de carbono negro (CN), contaminante que no solo impacta la calidad del aire, sino que también el clima (ver Box: “Carbono negro”, Capítulo 2). Las emisiones de CN, producto de la quema de leña, se obtuvieron suponiendo una participación del 10 % de CN en las emisiones de MP_{2,5} (EEA, 2016).

Bajo el escenario **BAU** desarrollado para este informe, se obtuvo que las emisiones de CN aumentan con respecto al 2017 en un 8 % y 17 % para los años 2030 y 2050, respectivamente. En tanto, bajo el escenario **Regional** se reducen en 5 % y 49 % para los años 2030 y 2050, respectivamente. Por su parte, en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por su sigla en inglés) de Chile también se evaluaron las emisiones

de este contaminante para varios escenarios distintos; entre ellos se consideró un escenario de Políticas Actuales (BAU NDC) y otro derivado del compromiso de carbono neutralidad al 2050 (Neu NDC) (Gallardo et al., 2020). Tanto las estimaciones del (CR)2 como las de la NDC, presentan reducciones porcentuales similares al año 2050 en los escenarios optimistas mostrados en la Figura 8. Sin embargo, las magnitudes de estas emisiones reducidas difieren considerablemente debido a las diferencias metodológicas en las estimaciones (ver Box: “Análisis de incertidumbre en las emisiones”, Capítulo 2). Por otra parte, la quema de leña es solo uno de los sectores responsable de las emisiones de CN, mientras que el sector industrial y la maquinaria fuera de ruta también son sectores con emisiones importantes de CN (Gallardo et al., 2020) y que, por lo tanto, también deben ser consideradas en una política de mitigación de este contaminante y agente climático.

Figura 8. Evolución de las emisiones de carbono negro por fuentes residenciales según los escenarios planteados en el texto. Los porcentajes se muestran respecto de 2017. Las líneas continuas muestran los escenarios de este trabajo. En línea punteada se presentan los escenarios de políticas actuales y carbono neutralidad que forman parte de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile (Gallardo et al., 2020). Los escenarios NDC no consideran efectos rebote.



An aerial photograph of a city, likely Temuco, Chile, taken at dusk or dawn. The image has a strong blue color cast and a hazy, atmospheric quality. In the foreground, a dense residential area with dark roofs is visible. In the background, a tall apartment building and a construction crane are prominent against the hazy sky. The overall mood is somber and atmospheric.

CAPÍTULO 7

Contaminación y pandemia

Autores:
Macarena Valdés
Pamela Smith
Laura Gallardo
Nicolás Huneeus
Mariel Opazo
Mauricio Osses
Rodrigo Seguel

1 | Contaminación por $MP_{2,5}$ y pandemia COVID-19



Desde el reporte del primer caso de COVID-19, en diciembre del año 2019, hasta la mitad del primer semestre 2020, se han confirmado alrededor de 11 millones de infectados y más de medio millón de muertes por COVID-19 a nivel mundial¹. La tasa de incidencia alcanzada en Chile durante este periodo da cuenta de casi 1.500 casos por cada 100 mil habitantes, una cifra que nos posicionó en el octavo lugar a nivel mundial según el observatorio de la Universidad de John Hopkins. Por otro lado, durante el primer semestre se ha llegado a una tasa de mortalidad de más de 30 muertes por cada 100 mil habitantes, esto es, alrededor de 6.000 fallecidos con una letalidad del 2 %¹. Aun cuando la pandemia se propagó de manera relativamente lenta entre marzo y abril, a partir de mayo su velocidad se intensificó con un número importante de casos aportados por la Región Metropolitana respecto de las otras regiones del país (*ver Anexo: Figura Curva epidemiológica*).

¿La exposición crónica a contaminación por material particulado se relaciona con COVID-19?

La causa de COVID-19 es el coronavirus conocido como SARS-CoV-2; sin embargo, existe creciente evidencia que sugiere que la contaminación atmosférica se relaciona con la tasa de incidencia y mortalidad por COVID-19. Así, en ciudades del Reino Unido, Estados Unidos y China, se ha mostrado que la exposición crónica a contaminantes como el material particulado ha intensificado los efectos de esta pandemia en la población (Travaglio et al., 2020; Wu et al., 2020; Das et al., 2020).

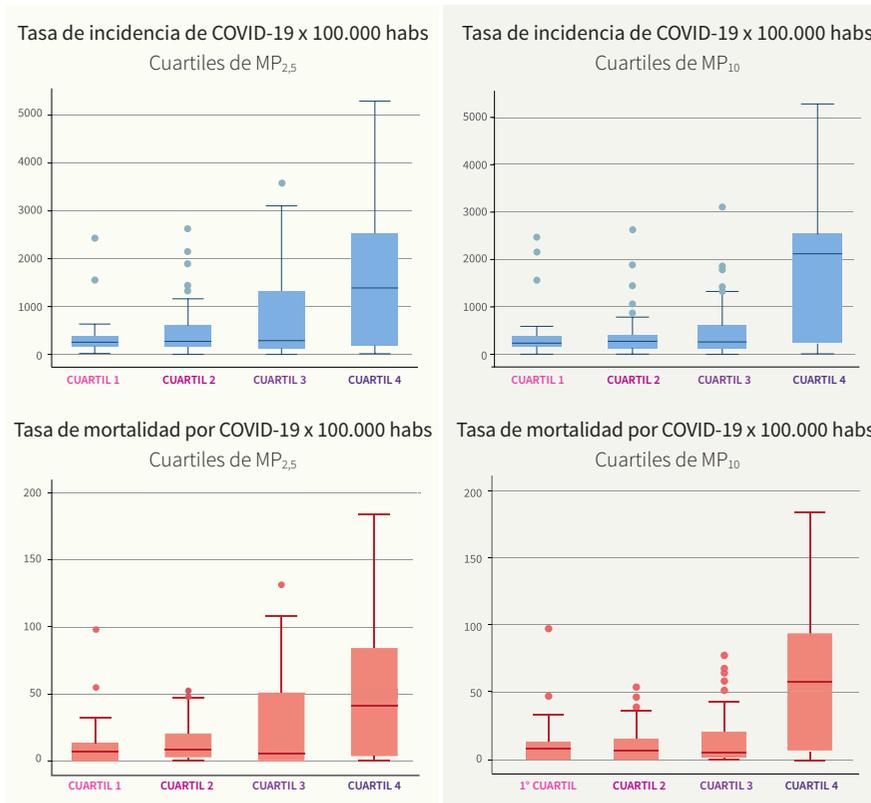
Esto último podría explicarse por la influencia negativa que tiene la contaminación sobre la inmunidad de las personas, afectando su capacidad de respuesta frente a amenazas microbiológicas como el coronavirus y otros virus y bacterias.

¹ Covid-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University Disponible en: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>

Considerando la información de nuestro país, en las comunas con mayor exposición crónica a contaminación por $MP_{2,5}$ y MP_{10} (esto definido como la exposición promedio en un año sin pandemia) se observa, en general, una mayor tasa de incidencia y mortalidad por COVID-19 (Figura 1). De todos modos, es importante mencionar que hay algunas excepciones respecto del comportamiento descrito, como, por ejemplo, las comunas de Antofagasta o Punta Arenas que, al comienzo de la pandemia, exhibieron mayores incidencias a pesar de presentar bajos niveles de exposición crónica a contaminación respecto del resto del país.

Para profundizar, se exploró esta relación considerando no solo los niveles de concentración de material particulado, sino que indicadores de salud, socioeconómicos, edad, movilidad y calidad de vivienda (*ver Anexo: Tabla 1*). Cabe destacar que se incluyó la humedad relativa del aire, considerando la hipótesis que indica que la transmisión del virus podría verse potenciada en presencia de climas fríos y secos, basada en el comportamiento de otros virus respiratorios (Wang et al., 2020).

Figura 1. Tasa de incidencia y mortalidad según cuartil de contaminación por $MP_{2,5}$ y MP_{10} con datos de concentración a nivel de ciudades. Se ordenaron las comunas del país según su nivel de contaminación (de menor a mayor) y se dividieron en cuatro grupos (cada uno se denomina cuartil y representan un 25 %), permitiendo observar que las comunas del cuartil de menor exposición (columna izquierda de los gráficos) exhiben valores más bajos de tasas de incidencia y mortalidad, esto pese a que hay algunos valores que se escapan a la tendencia general (los puntos en la figura). De todos modos, la tendencia general muestra que mientras mayor es el nivel de exposición, más altos son los valores de incidencia y mortalidad que podemos encontrar.



CUARTIL 1: La Cruz, Rinconada, Peumo, Llaillay, Limache, Catemu, Codegua, Mostazal, Doñihue, Santa María, Hijuelas, Chile Chico, Pichilemu, Curacaví, San José de Maipo, Algarrobo, Peralillo, Olmué, Punitaqui, Coltauco, Romeral, Rauco, Nogales, Casablanca, Cabildo, Nancagua, San Esteban, Tucapel, Chimbarongo, Los Andes, San Felipe, Colbún, Pichidegua, Teno, Molina, Putaendo, Santa Cruz, Curacautín, Cunco, Calera, Salamanca, Rengo, Quillota, Combarbalá, Monte Patria, Illapel y Ovalle.

CUARTIL 2: Graneros, Quirihue, Quintero, Vitacura, San Rosendo, Yungay, Concón, El Tabo, El Quisco, Coelmu, Curanilahue, Santo Domingo, Machalí, Villa Alemana, Lota, Quillón, Puchuncaví, Hualqui, Requinoa, La Reina, Lo Barnechea, Pirque, Cartagena, Santa Juana, San Vicente, Loncoche, Purén, Los Muermos, Yumbel, Pucón, Cañete, Lebu, Villa Alegre, Constitución, Colina, Arauco, Retiro, Villarrica, Victoria, Longavi, Melipilla, Panguipulli, San Antonio, Cauquenes, Quellón, San Clemente y Valparaíso.

CUARTIL 3: Padre Hurtado, Bulnes, Olivar, Las Condes, Laja, Peñaflo, Frutillar, Llanquihue, Chiguayante, Maule, Gorbea, Traiguén, Penco, Ñuñoa, Huechuraba, Lampa, Dalcahue, Puerto Varas, Cabrero, Paine, Pitrufquén, Nacimiento, Mulchén, Recoleta, Providencia, Quilpué, San Fernando, Río Bueno, Los Lagos, Mariquina, Buín, Conchalí, Coronel, Chonchi, Tomé, Peñalolén, Ancud, San Javier, Nueva Imperial, Lautaro, Parral, Rancagua, Puente Alto, Curicó, La Florida, Colbuco y Viña del Mar.

CUARTIL 4: El Monte, La Cisterna, Río Negro, San Miguel, Independencia, Chillán Vieja, Macul, Cerrillos, Aysén, Estación Central, Talagante, Renca, San Ramón, Santiago, Isla de Maipo, Lo Prado, Lo Espejo, Cerro Navia, Quinta Normal, Quilicura, Pedro Aguirre Cerda, La Granja, San Pedro de la Paz, San Carlos, Angol, San Joaquín, El Bosque, Hualpén, La Pintana, Padre Las Casas, La Unión, Coyhaique, Talcahuano, Concepción, Castro, Osorno, Pudahuel, San Bernardo, Linares, Maipú, Chillán, Talca, Valdivia, Temuco, Puerto Montt y Los Angeles.

En las comunas de la quinta a la décima región, los resultados muestran que la tasa de incidencia y mortalidad por COVID-19 están significativamente relacionadas con los niveles de exposición crónica a MP_{2,5} y MP₁₀ (*ver Anexo: Tabla 2*), y otros de los indicadores de ajuste incluidos. En el caso de la tasa de incidencia, por cada microgramo por metro cúbico de aumento de MP_{2,5} y MP₁₀ a nivel comunal, la incidencia aumentó en 2,7 % y 1,9 %, respectivamente. En el caso de la tasa de mortalidad, cada microgramo por metro cúbico de aumento de MP_{2,5} y MP₁₀ significó un incremento de la mortalidad en 1,9 % y 1,3 %, respectivamente.

Estos resultados evidencian el impacto adverso de la inequidad socioeconómica y ambiental que se observa a nivel nacional, ocasionando peores resultados en enfermedades como el COVID-19. La contaminación del aire ha incrementado la sensibilidad de las personas a enfermedades infecciosas, al igual que otros aspectos relacionados con la vivienda y el territorio, como el hacinamiento medio, el año de construcción de la

vivienda, la humedad relativa y el movimiento medio comunal del periodo; adicionalmente, el índice de vejez comunal mostró relación con la tasa de mortalidad, lo que en países como el nuestro, con un perfil envejecido avanzado, debe ser una preocupación para robustecer el sistema de salud (*ver Anexo: Tabla 2*).

Impacto del confinamiento por COVID-19 en emisiones y calidad del aire.

Entre las medidas adoptadas para evitar la propagación de COVID-19, destacan las cuarentenas y los toques de queda. Estas se han aplicado de manera parcial o total en diversas ciudades del país resultando en una reducción de la movilidad de la población. Aquí abordamos cómo estas medidas han impactado a las emisiones de contaminantes primarios y cómo ello se ha traducido en cambios en la calidad del aire. Con ello, más allá de cuantificar los cambios, se quiere inferir antecedentes valiosos para la toma de decisiones.



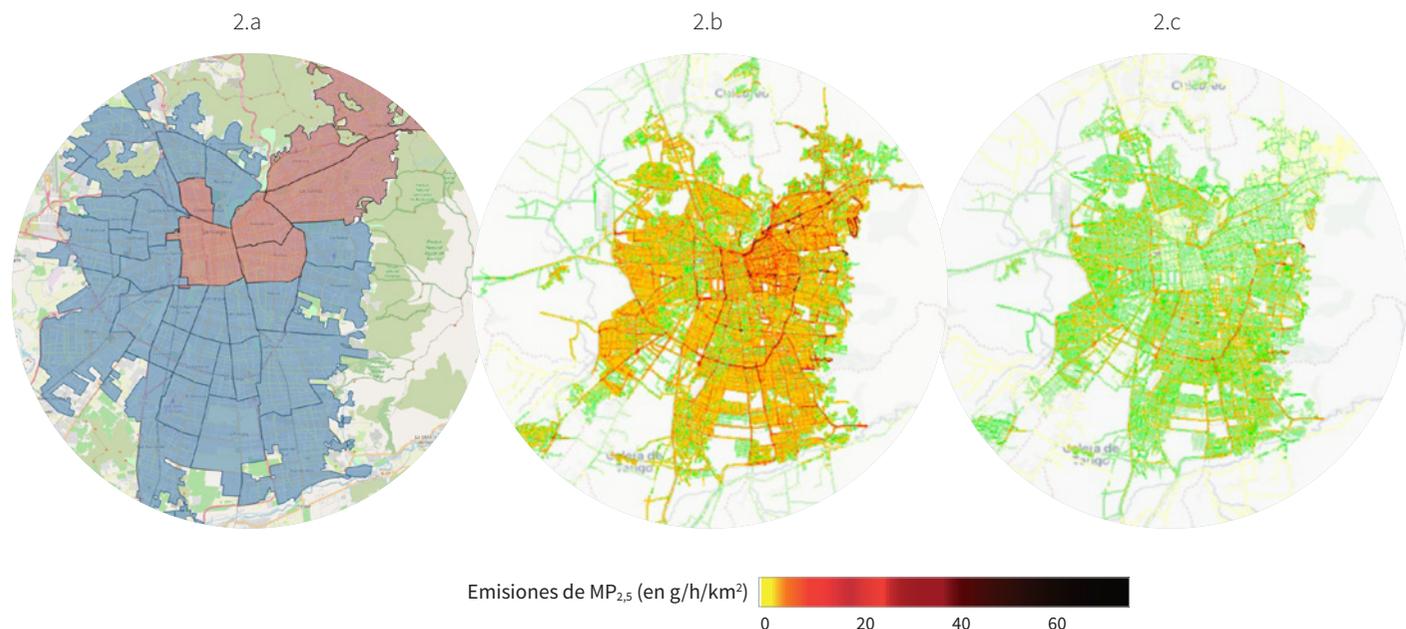
Foto: Ciudad de Santiago en cuarentena

En un primer análisis, se estudió el impacto de la primera cuarentena de la Región Metropolitana, la que afectó a siete de sus 52 comunas, entre el 23 de marzo y el 10 de abril del 2020 (cerca del 20 % de la población de la ciudad), y el toque de queda nocturno aplicado a toda la región (Seguel et al., 2020).

Como muestra la Figura 2, las siete comunas con restricciones obligatorias mostraron una reducción en los viajes motorizados entre un 73 % y un 83 %, mientras que el resto de las comunas variaron entre un 42 % y un 54 %. El transporte público disminuyó en un 82 % en toda la ciudad. De lunes a sábado se constató un 63 % de baja en los viajes motorizados, y un 72 % en domingo. Ello se tradujo en una reducción sustantiva de las emisiones de fuentes móviles, pero de manera diferenciada en distintas zonas de la ciudad.

Las Figuras 2b y 2c muestran dicho cambio tomando como referencia un día hábil de abril a las 19:00 horas: mientras en las comunas con cuarentena las emisiones de $MP_{2,5}$ se redujeron en hasta un 92 %, en las comunas sin restricción se llegó solamente hasta un 46 %. A nivel horario, la reducción en la actividad del tráfico y sus emisiones permanece relativamente constante las 24 horas del día en los distritos de mayores ingresos donde se aplicó la cuarentena, alcanzando un 50 % de reducción en las emisiones móviles diarias. En el resto de la ciudad se observa un menor cumplimiento de las restricciones de las 05:00 a 19:00 horas, con reducciones promedio de 20 % en las comunas sin confinamiento obligatorio. El toque de queda nocturno indujo una reducción del tráfico de casi un 100 % en toda la ciudad desde las 22:00 a las 04:00 horas.

Figura 2. (2a) Comunas sin confinamiento obligatorio (azul) y con confinamiento obligatorio (rojo) entre el 23 de marzo y el 10 de abril de 2020. Las Figuras (2b) y (2c) muestran la distribución espacial de las emisiones horarias de $MP_{2,5}$ (en $g/h/km^2$) generadas por actividad vehicular sobre el Gran Santiago durante la primera semana de abril 2020 para: (2b) día hábil normal a las 19:00 horas y (2c) las mismas condiciones durante confinamiento. Se aprecia el efecto de las restricciones obligatorias en las comunas del sector noreste de la ciudad, comparado con las comunas sin confinamiento obligatorio. Resolución espacial 100x100 metros.

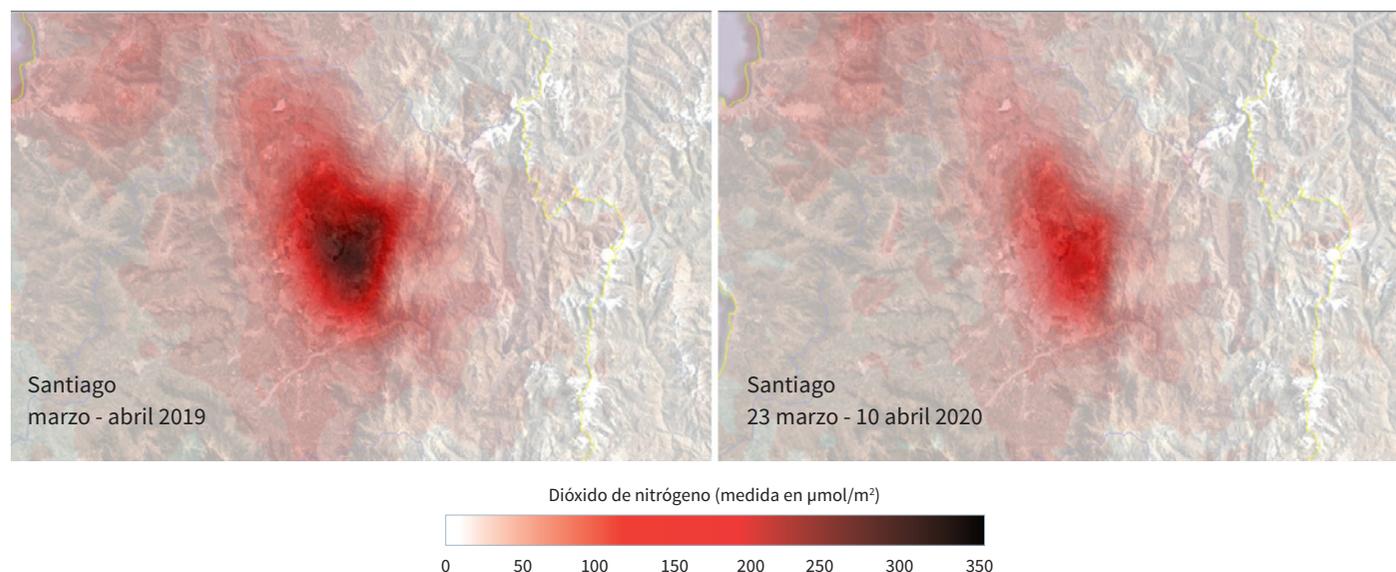


Como en otras ciudades del mundo, los efectos de la cuarentena se pudieron observar a través de imágenes satelitales. La Figura 3 muestra una reducción de alrededor de un 40 % de dióxido de nitrógeno (NO_2) en la columna atmosférica para el periodo 23 de marzo - 10 de abril de 2020, comparado con el periodo marzo - abril de 2019. Lo anterior es también consistente con la estimación de reducción para las fuentes móviles de Santiago durante la primera parte de la cuarentena (Seguel et al., 2020). Por su parte, el ozono, un contaminante secundario formado en la atmósfera, aumentó durante el mismo periodo. Si bien dicha respuesta puede resultar sorprendente, se explica por procesos fotoquímicos complejos (*ver Anexo: “Contaminación secundaria en Chile”*).

Con todo, este primer estudio del efecto de la cuarentena en Santiago nos mostró que para abordar el problema de la calidad del aire en esta ciudad no basta con considerar las emisiones primarias, sino que también se deben incluir los procesos que ocurren en la atmósfera, incluyendo los fotoquímicos (Menares et al., 2020).

Si se comparan los meses de marzo a junio de 2020 con el mismo periodo de los años 2014 a 2019, hallamos concentraciones medias mensuales de $MP_{2,5}$ más bajas respecto de las ocurridas este año y eso sin las restricciones implementadas durante la pandemia (Figura 4). La única excepción es junio de 2020, cuya disminución en las concentraciones se debió a las numerosas precipitaciones ocurridas durante dicho mes.

Figura 3. Columna atmosférica de dióxido de nitrógeno (medida en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$) observada desde la plataforma TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI, www.tropomi.eu), para el periodo marzo a abril de 2019 (a la izquierda) y de la cuarentena entre el 23 de marzo y el 10 de abril de 2020 (a la derecha). Esta imagen fue gentilmente proporcionada por H. Eskes del Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI).

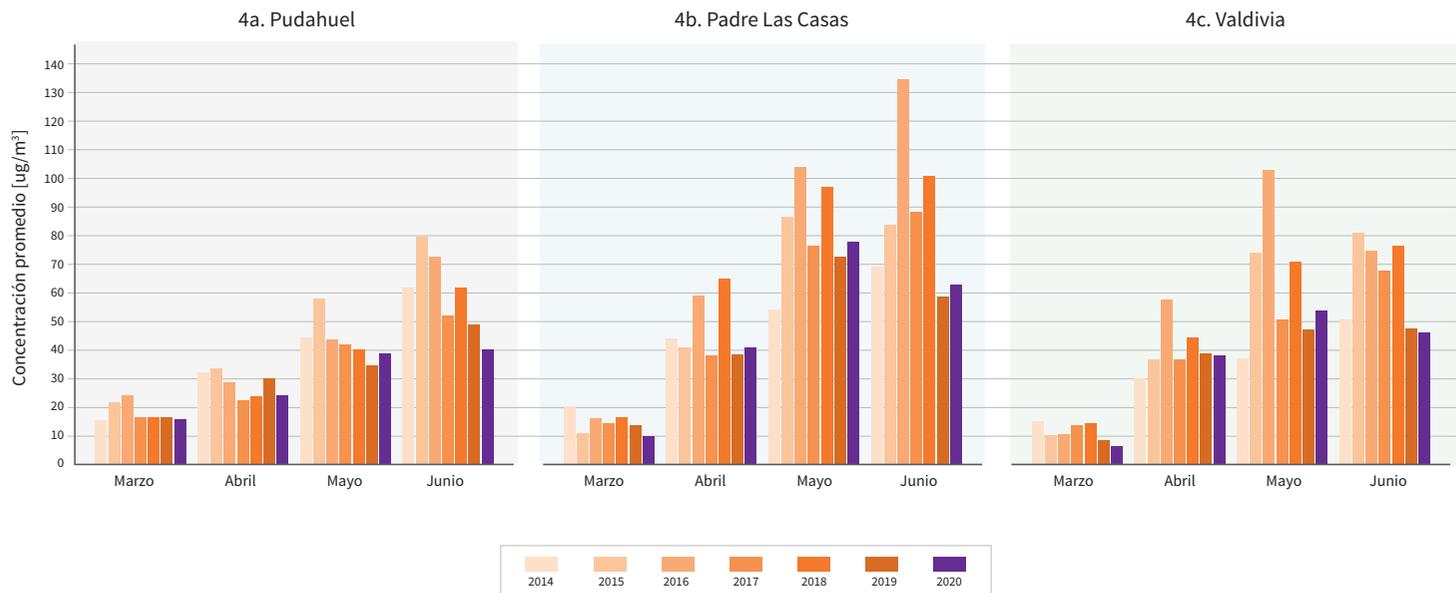


En general, un comportamiento similar se puede observar en las ciudades de Temuco y Valdivia, pese a que esta última no presentó cuarentena. Sin embargo, si se examina la evolución diaria de las concentraciones, se observa que sí ha habido periodos acotados en que las concentraciones en pandemia han sido menores a años anteriores. Adicionalmente, y consistente a lo anterior, las ciudades de Santiago y Valdivia, en promedio, han experimentado menos Alertas y Preemergencias este 2020 en comparación con el mismo periodo entre los años 2014-2019; en tanto, Temuco también ha disminuido sus Preemergencias, pero ha contado con más episodios de Alertas.

Apesar de todas las restricciones de movilidad que se han implementado en ciudades como Temuco y Santiago, en promedio, la calidad del aire no ha sido mejor que

en años anteriores. Pese a esto, las medidas han sido efectivas en reducir las emisiones de transporte y queda aún pendiente estimar el impacto de estas medidas en las emisiones residenciales y del sector industrial. Si bien es de esperar que las emisiones industriales hayan disminuido durante este periodo, es probable que las emisiones residenciales hayan aumentado producto del mayor tiempo que la población ha permanecido en sus viviendas por las medidas de confinamiento. Sin embargo, sin la cuantificación de los cambios en las emisiones producto de las medidas tomadas en este tiempo, no se puede estimar el aporte de cada uno de los sectores de emisión en la calidad del aire. En términos generales, esto revela que la evaluación de una medida requiere del conocimiento de las emisiones de los distintos sectores que impactan la calidad del aire.

Figura 4. Concentración promedio mensual de $MP_{2,5}$ para los años 2014 al 2020 en las estaciones de monitoreo de: (4a) Pudahuel (Santiago), (4b) Padre Las Casas y (4c) Valdivia.





Conclusiones

Foto: Ciudad de Coyhaique

La calidad del aire es un problema complejo que no solo responde a factores físico-químicos, sino que también depende de variables socioculturales, económicas e institucionales. En el presente informe se han considerado estos diferentes factores, enfatizando su relación con la contaminación por partículas completamente respirables ($MP_{2,5}$) del sector residencial.

Mediante la integración de datos históricos, instrumentales y herramientas computacionales, fue posible caracterizar la evolución de la contaminación atmosférica en Chile, evidenciando un gradual deterioro en la calidad del aire durante los últimos 2.000 años, con un marcado incremento del deterioro durante el siglo XX. Esta tendencia se relaciona directamente con el crecimiento económico, urbano y demográfico en el país. Sin embargo, se advierte una mejoría paulatina en la calidad del aire durante las últimas décadas en la medida que se han implementado planes de descontaminación y políticas públicas para el monitoreo y control de emisiones. No obstante, dicha mejoría aún no es suficiente, los impactos de la gestión ambiental son espacial y temporalmente heterogéneos, y no existe evidencia suficiente sobre la eficiencia y efectividad de las políticas implementadas.

A nivel nacional, el uso de leña para calefacción y cocción de alimentos representó el 94 % de las emisiones de $MP_{2,5}$ del año 2017, distribuidas de manera diferenciada a lo largo de Chile continental. En las ciudades del centro y sur del país, las emisiones de $MP_{2,5}$ provienen principalmente del uso residencial de leña, mientras que en la zona norte provienen de los sectores transporte e industria; en tanto, en Santiago se da una combinación de estos tres sectores. Sin embargo, sin la cuantificación de las emisiones no se puede estimar el rol de cada uno de los sectores de emisión en la calidad del aire.

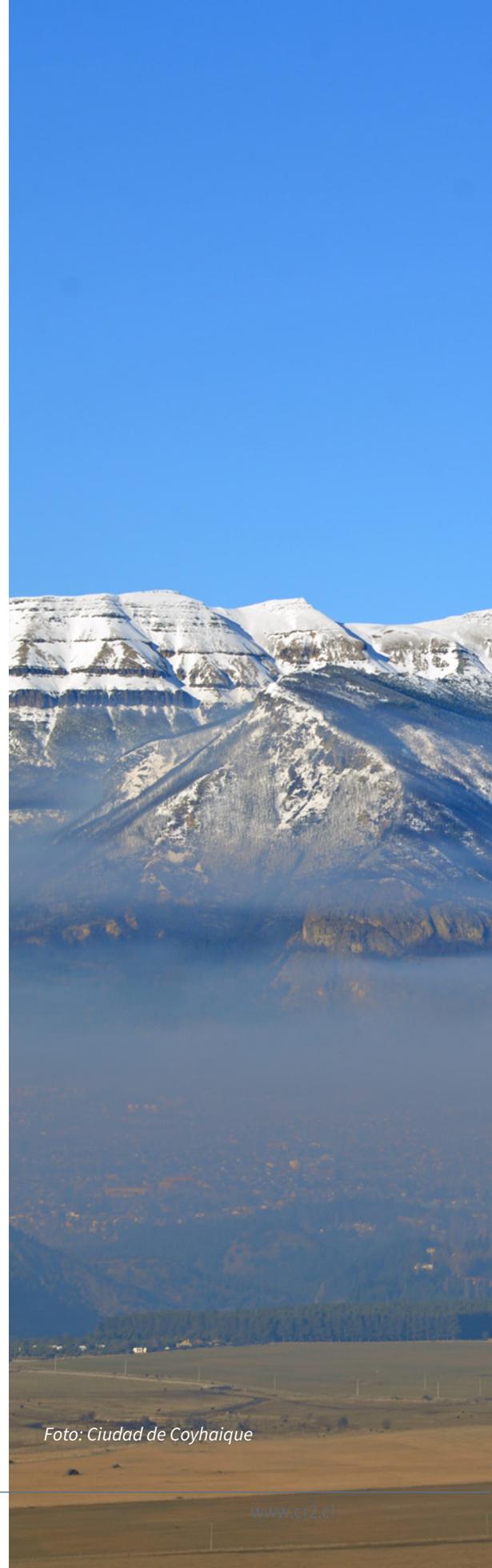


Foto: Ciudad de Coyhaique

Adicionalmente, a pesar del contraste de climas en Chile, se identifica un patrón meteorológico común durante episodios de baja ventilación atmosférica y de alta contaminación por partículas en ciudades de las zonas centro y sur. Esta situación es particularmente crítica en invierno, con bajos niveles de ventilación y altas emisiones de MP_{2,5} por calefacción.

El tipo de combustible disponible y asequible, los artefactos utilizados para la combustión y la aislación térmica de la vivienda determinan los requerimientos energéticos y las posibilidades de calefacción de un hogar. En este contexto, la leña es valorada por ser el energético de menor precio, por el tipo de calor que entrega, por la multifuncionalidad de los artefactos asociados y porque es posible acceder a ella por diversos medios. Se debe enfrentar el problema asociado de pobreza energética definido por las dificultades para acceder a servicios energéticos de alta calidad, lo que en este caso trae como consecuencia la contaminación atmosférica por el uso intensivo de la leña.

Se identificaron múltiples barreras para la transición energética en los casos analizados, entre ellas destacamos: deficiente aislación térmica de las viviendas, limitada infraestructura para el almacenamiento de leña, falta de conocimientos en eficiencia energética, arraigo cultural a la leña y los artefactos asociados, altos umbrales de confort térmico y desconocimiento de la contaminación intradomiciliaria. En este contexto, también se identificaron diferencias generacionales en la disposición a cambiar las prácticas de calefacción. Desde el punto de vista de la política pública, las estructuras que dificultan la transición son: baja autonomía de las instituciones regionales en la toma de decisiones, altos costos económicos relacionados con las soluciones estructurales, implementación de soluciones de corto plazo, limitado alcance y que no priorizan criterios técnico-científicos, tratamiento fragmentado de la leña en el marco jurídico, descoordinación y duplicación de políticas, tiempos extensos para la implementación de los planes de descontaminación, baja participación social y falta de legitimidad de políticas públicas, deficiente fiscalización, ausencia de normas de calidad de los combustibles y vacíos normativos relacionados con la calefacción.

Nuestros resultados indican que en Chile existen anualmente cerca de 3.000 admisiones hospitalarias y aproximadamente 4.500 muertes evitables por exposición a $MP_{2,5}$ de personas de todas las edades. Sin embargo, las estimaciones oficiales de muertes asociadas a la contaminación atmosférica por $MP_{2,5}$ son menores, pues solo consideran los efectos cardiopulmonares en población adulta y no de la población envejecida, a pesar de que Chile está en una etapa avanzada de la transición demográfica de envejecimiento de la población. En cambio, la estimación que hemos presentado incluye efectos cardiopulmonares y todas las causas naturales (se exceptúan causas externas o no naturales como accidentes, crímenes, etc.) de acuerdo con la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), incluyendo a toda la población sin distinción etaria. Nuestros cálculos indican que la mortalidad anual por $MP_{2,5}$ se podría subestimar en alrededor de un 50 % si solo se consideran los efectos cardiopulmonares.

Con respecto a las cargas ambientales, estas tienen una distribución heterogénea a lo largo del país y se relacionan con la distribución de variables socioeconómicas, reproduciendo así otras formas de desigualdad. De la misma manera, la salud de las personas será más o menos vulnerable a la contaminación por $MP_{2,5}$ dependiendo de su nivel de exposición y condición previa.

A su vez, la vulnerabilidad dependerá de su sensibilidad y su capacidad de adaptarse frente a la amenaza del $MP_{2,5}$. Para este informe estimamos la sensibilidad de la población frente al impacto del $MP_{2,5}$ considerando indicadores etarios, sanitarios y de pobreza multidimensional a escala comunal para 324 comunas entre las regiones de Coquimbo y Magallanes. Dicha estimación muestra una distribución heterogénea en el que las ciudades del centro y sur de Chile continental resultan especialmente vulnerables. Esta aproximación permite priorizar el seguimiento de los grupos más sensibles de la población, identificando, en primer lugar, comunas y, luego, en su interior, aquellas zonas que deban ser atendidas.

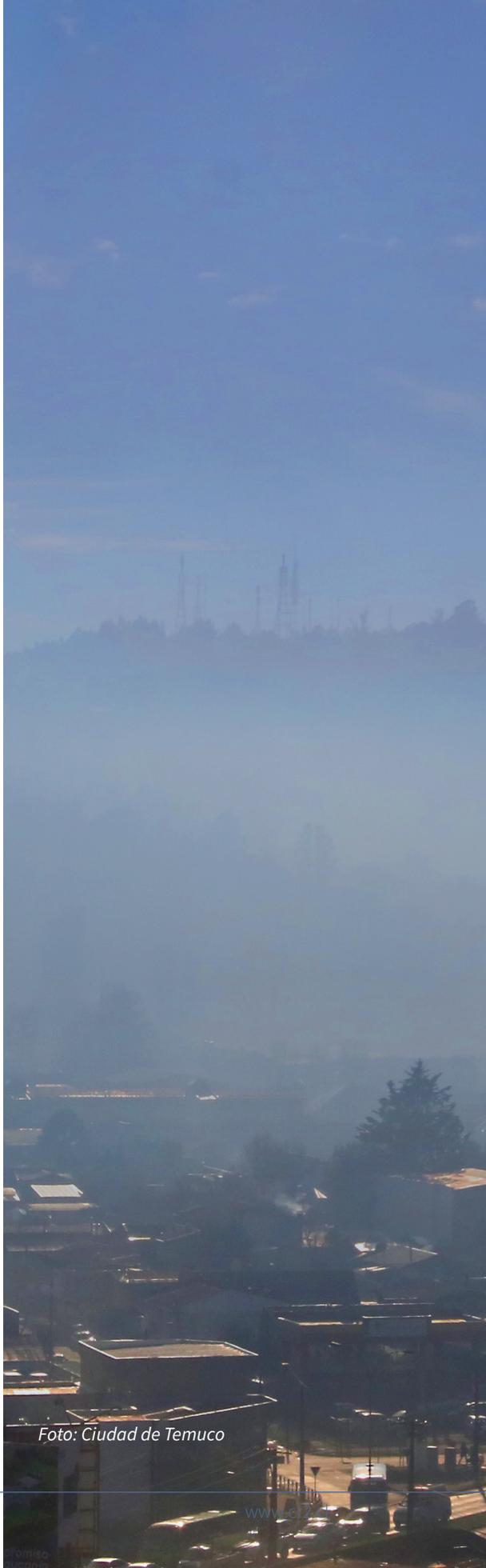


Foto: Ciudad de Temuco

El tiempo apremia

El cambio climático también influiría en la problemática de la contaminación por MP_{2,5}, pues, entre otras, se verán afectadas las condiciones de mezcla y ventilación de contaminantes atmosféricos. Nuestras estimaciones muestran que el cambio del clima redundará en condiciones favorables, neutras o desfavorables en distintas zonas de Chile continental. Así, por ejemplo, mientras la frecuencia de condiciones meteorológicas desfavorables a la dispersión de contaminantes posiblemente se verá incrementada en las regiones del sur del país, dicha frecuencia puede disminuir en la zona centro y norte.

Adicionalmente, el estudio del efecto de la cuarentena en Santiago mostró que para abordar el problema del material particulado en la capital no basta con considerar las emisiones primarias, sino que también se deben incluir los procesos que ocurren en la atmósfera, incluyendo los fotoquímicos.

Debido a estos distintos factores, el futuro de la contaminación atmosférica por partículas estará determinado, en primer lugar, por las acciones y políticas orientadas a reducir las emisiones que adoptemos como sociedad, tanto de emisiones directas como de precursores de formación de contaminantes en la atmósfera. Según las proyecciones de emisiones estimadas en este informe, las simulaciones de la dispersión de contaminantes, y las barreras socioculturales, económicas y políticas, queda claro que los actuales esfuerzos para mejorar la calidad del aire están lejos de ser suficientes. Todo esto, sumado a un escenario generalmente desfavorable para la calidad del aire debido al cambio climático, hace necesario acelerar los esfuerzos por mejorar la calidad de vida de la población y transitar hacia un comportamiento más sostenible.

An aerial photograph of a city, likely Temuco, Chile. The foreground shows a large, modern white building with a prominent glass facade. Below it, there are dense green trees. In the background, a dense urban area with various apartment buildings and houses stretches towards the horizon under a dramatic, cloudy sky. A blue rectangular graphic element is positioned to the left of the main title.

Recomendaciones

Una vez comprendidas las distintas aristas del fenómeno de la contaminación atmosférica y tomando en cuenta los grandes desafíos que tiene Chile al respecto, es posible identificar un conjunto de recomendaciones que apuntan a reducir la contaminación atmosférica en el país y sobrepasar las barreras identificadas.

Foto: Ciudad de Temuco



Más y mejor información para la gestión de la calidad del aire

De acuerdo con los antecedentes presentados en este informe y nuestro juicio experto, hay un amplio espacio de mejora para la gestión de la calidad del aire y episodios críticos.

En cuanto a **emisiones**, proponemos:

- Implementar un sistema nacional de inventarios de emisiones –con contaminantes criterio y precursores climáticos de vida corta– que sea análogo y consistente con el de gases de efecto invernadero, que satisfaga las condiciones de transparencia (metodología, supuestos, replicabilidad, sometido a evaluación por pares y de libre acceso), correctitud (evaluación e incertidumbre cuantificada), completitud (distribuidos temporal y espacialmente para múltiples especies y trazas) y comparabilidad (que permita análisis retro y prospectivos).
- Disminuir crecientemente la incertidumbre a partir de una mejor caracterización de los niveles de actividad y del desarrollo de factores de emisión representativos de las condiciones locales. Esto es particularmente urgente en el caso de la quema de leña doméstica.
- Desarrollar inventarios de alta resolución espacial (grillas de 1km x 1km) y temporal (horario, semanal, estacional y anual). Estos inventarios permitirían evaluar de manera eficaz, precisa y rápida las medidas de mitigación.

En cuanto a **observaciones y mediciones**, proponemos:

- Complementar el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, adicionando a las trazas normadas mediciones de gases precursores de contaminantes secundarios (por ejemplo, compuestos orgánicos volátiles) y mediciones regulares de la composición química (especiación), y distribución de tamaño del material particulado en, al menos, una estación de cada ciudad.
- Integrar mediciones de la columna atmosférica que permitan cuantificar las condiciones de mezcla y de estabilidad en, al menos, una estación representativa de cada ciudad.
- Contar con sistemas de monitoreo, reporte y verificación que permitan hacer un seguimiento a las medidas de mitigación, discriminando empíricamente las que son más efectivas para reducir emisiones de las que no lo son, de manera de potenciar las medidas más eficientes.





Más y mejor
información para
la gestión de la
calidad del aire



En cuanto a **modelación**, proponemos:

- El diseño de futuras y exitosas políticas de mitigación requiere conocer el impacto del cambio climático en modular la calidad del aire. Para ello se deben aplicar modelos regionales de química atmosférica y transporte forzados por distintos escenarios climáticos. Estas simulaciones de escenarios futuros deben cubrir, por lo menos, el periodo 2020 a 2050 e, idealmente, también considerar distintos escenarios de emisiones.
- Estas simulaciones son computacionalmente intensivas y se requiere de una infraestructura potente, robusta y desarrollada para realizarlas. Por lo tanto, recomendamos prolongar y reforzar la capacidad de procesamiento instalada en el Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC) para la realización de estas y otras simulaciones que contribuyan al diseño de medidas de mitigación que mejoren la calidad del aire.

En cuanto a **indicadores sociales**, proponemos:

- Incorporar indicadores específicos del uso de la energía en la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) para tener un diagnóstico acabado del uso de combustibles contaminantes a nivel de hogar.
- Mejorar la representatividad de herramientas socioeconómicas (como, por ejemplo, la Encuesta de Presupuesto Familiar) para contar con información desagregada, al menos a nivel regional, y así dar cuenta de la diversidad de fuentes y usos de energía, y conocer los hábitos de consumo de energía y los umbrales de equidad en el acceso.
- Crear un instrumento regular y de extensión nacional que entregue de manera sistemática e integral información sobre el consumo de leña, como prácticas de consumo, caracterización de aparatos y cantidad de leña consumida. Esta información contribuirá a diseños de políticas públicas más ajustadas a la realidad local y permitirá también cuantificar mejor las emisiones del sector residencial.



Mejoras en planes de prevención y descontaminación atmosférica

Los PDA y PPDA aplicados en Chile han mostrado avances sustantivos desde su implementación. Sin embargo, la calidad del aire en los lugares donde se aplican aún muestra condiciones incompatibles con la salud según las normas primarias nacionales y, más aún, respecto de las indicaciones de la OMS.

Recomendamos:

- Flexibilizar los requisitos para la dictación de los planes de prevención e incorporar cláusulas de actualización de sus medidas bianuales, en base a los resultados obtenidos para así no llegar a la superación del 80 % de la norma de calidad. La actualización debería autorizar la imposición de medidas más estrictas para las fuentes contaminantes, sin necesidad de implementar un nuevo proceso de elaboración del instrumento.
- Extender el área de aplicación de los PDA y PPDA a las regiones definidas por el alcance atmosférico de los contaminantes y sus precursores, y no solo a las unidades administrativas donde se constata la superación de normas de calidad del aire. Eso implica tener un alcance que vaya más allá del límite urbano y considere a macrozonas políticas y administrativas, así como a una multiplicidad de actores.
- Considerar en el diseño de medidas de los PDA y PPDA no solo la dimensión económica de la factibilidad de implementar ciertas tecnologías, sino que también los contextos sociales, culturales y económicos donde serán implementados. Esto ayudará a mejorar la eficacia y la eficiencia de las medidas al contar con mayor capacidad de anticipación a condiciones de implementación con alta incertidumbre, por ejemplo, derivados de condiciones de pobreza energética o de alta informalidad del mercado local.
- Incorporar con fuerza la participación científica y ciudadana en general en el diseño y evaluación de las medidas, y que su involucramiento no se limite a las consultas públicas. La participación es un derecho, cuyo ejercicio depende del acceso a la información y se completa con el acceso a la justicia ambiental (Principio 10 de la Declaración de Río y Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente). Además, permite la apropiación por parte de la ciudadanía de los objetivos y alcance de los PDA y PPDA, y favorece la discusión intersectorial y ciudadana con una base común.
- Implementar una evaluación de calidad regulatoria de los PDA y PPDA que incluya estándares de seguimiento, información y verificación regular del cumplimiento de las medidas en ellos contenidas para asegurar el cumplimiento de las metas de mitigación, así como asegurar la necesaria fiscalización y adoptar rectificaciones oportunas.

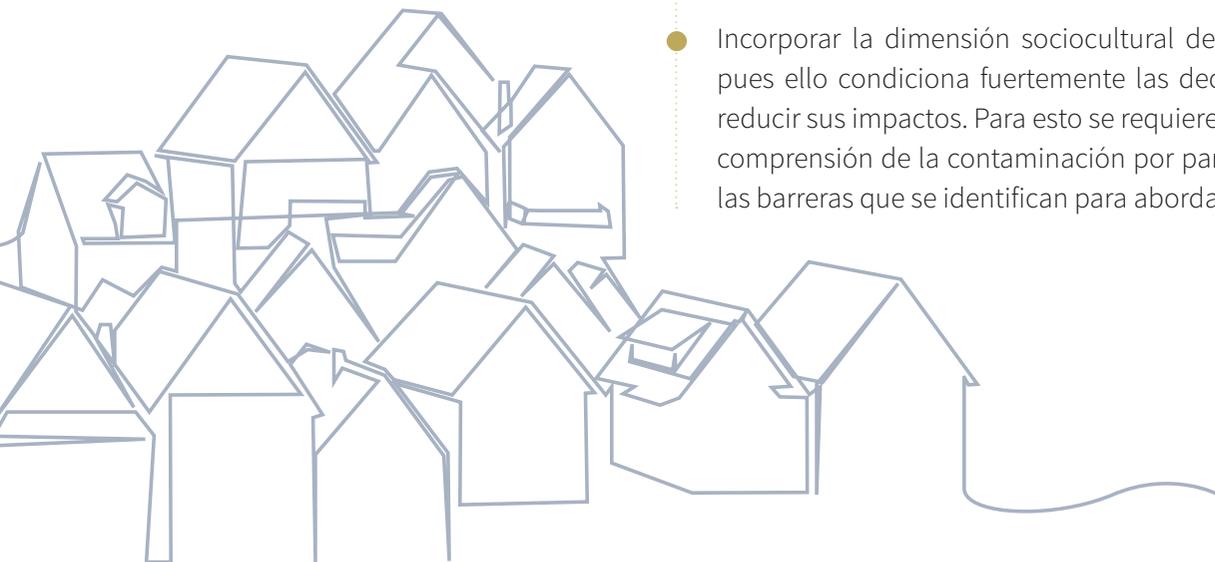




Superación de las barreras a la transición energética

Con respecto a las barreras para la transición energética en el sur de Chile proponemos:

- Acelerar la discusión e implementación de una ley de biocombustibles sólidos (leña). Esto es crucial para la regulación del mercado de la leña, para apresurar los procesos de descontaminación atmosférica y disminuir los niveles de contaminación intradomiciliaria en el sur del país.
- Promover con urgencia la celeridad en la discusión e implementación de la Ley de Eficiencia Energética, la cual contempla mecanismos obligatorios para la calificación energética de viviendas nuevas y abre la posibilidad de integrar viviendas existentes en este proceso. Además, facilita la regulación del mercado de la leña al categorizarla como combustible.
- Aumentar el estándar de la Norma Térmica de viviendas con pertinencia territorial, estableciendo un cronograma claro de mejoramiento progresivo de la reglamentación térmica que considere la Calificación Energética de Viviendas para el parque existente y futuro. Esto es coherente con la evaluación de la eficiencia energética y permite mejorar los estándares de información del mercado inmobiliario, asimismo permite contar con una línea base de calidad de las edificaciones que permita hacer más eficiente los programas de mejoramiento.
- Incorporar la dimensión sociocultural de la contaminación del aire, pues ello condiciona fuertemente las decisiones que se toman para reducir sus impactos. Para esto se requiere incentivar estudios sobre la comprensión de la contaminación por parte de los distintos actores y las barreras que se identifican para abordarla.





Impactos sobre la salud: mucho más que conteos nacionales

Los impactos de la contaminación atmosférica son tanto agudos como crónicos. Estos impactos no solo dependen de los niveles y tiempos de exposición, sino que también de la edad, las enfermedades que tengan las personas, las condiciones socioeconómicas, etc. Vale decir, los impactos sobre la salud no solo deben ser evaluados como impactos agregados, sino también se debe considerar quiénes, dónde, cuándo y cómo se ven afectados.



Proponemos:

- Complementar la escala comunal de los datos sanitarios del Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) con información de la localización de los casos, salvaguardando, por supuesto, la privacidad de los datos personales. Esto permitiría mejorar la caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación atmosférica y definir medidas de mitigación con relevancia territorial dentro del espacio comunal.
- Evaluar los impactos en mortalidad y morbilidad de la contaminación no solo en términos de las normas primarias de calidad de aire, sino que también respecto de las guías de la OMS, transparentando y armonizando las metodologías aplicadas. Mientras la normativa nacional establece niveles alcanzables en un marco de factibilidad técnica y económica, la de la OMS permite explicar el impacto efectivo de la contaminación atmosférica para contaminantes criterio.
- Adoptar los lineamientos de la OMS para estimar la vulnerabilidad de la población ante la contaminación atmosférica en cuanto a considerar no solo la mortalidad por impactos cardiopulmonares, sino que también la fracción atribuible a la contaminación de todas las causas naturales de muertes, y, además, considerar a toda la población, especialmente a las personas mayores. Esto se justifica, pues los efectos sobre la salud de la calidad del aire son sistémicos y acumulativos, contribuyendo a la morbilidad y la mortalidad tras la exposición crónica a la contaminación.
- Complementar la mirada nacional del informe anual del estado del medio ambiente, elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente, con los resultados a escala subnacional regional, comunal y urbana.



Finalmente, abordar los desafíos relacionados con la contaminación atmosférica requiere **fortalecer el vínculo** entre universidades, centros de investigación, asociaciones científicas y los tomadores de decisiones en el ámbito de la política pública. En este contexto, es fundamental **comprender** los componentes climáticos, geográficos, económicos, políticos, jurídicos y culturales, para producir información coherente y consistente que permita **realizar diagnósticos** desde una perspectiva inter y transdisciplinaria. Esto permitiría proponer **soluciones** factibles de implementar en el corto, mediano y largo plazo, favoreciendo la toma de decisiones basada en la evidencia y pertinente a nivel **nacional, regional y local**.

Agradecimientos

- **Powered@NLHPC:** Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02)
 - **Red de Pobreza Energética - RedPE**
 - **Iniciativa Interfacultades Energía, Agua y Sustentabilidad – ENEAS**
 - **Instituto Forestal (INFOR) Los Ríos,** Alejandra Schueftan y René Reyes.
 - **Universidad de Aysén,** Sebastián Ibarra
 - **Universidad de la Frontera,** Álex Boso y Jaime Garrido
 - **Universidad Católica de Temuco,** Nicolás Schiappacasse
 - **Laboratorio Ecoclimático (Programa Regional ANID R17A10002*) del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP).**
 - **H. Denier van der Gon,** del Departamento de Clima, Aire y Sustentabilidad de TNO, Utrecht, Países Bajos.
 - **H. Eskes,** del Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), Utrecht, Países Bajos.
 - **L. Menuet, S. Mailler y R. Lapere,** del Laboratorio de Meteorología Dinámica de la Escuela Politécnica, Palaiseau, Francia
 - **Fondecyt N°11180824** “Expresiones territoriales, económicas y socioculturales de la pobreza energética en Chile: un estudio a partir de las diferentes zonas climáticas del país”.
 - **Fondecyt N°1160857** “La vida social de la energía: trayectorias territoriales de la energía en tres regiones del sur-austral de Chile”
 - **Fondecyt N° 1190412** “Calidad del aire, vulnerabilidad social y percepción de riesgo: un análisis desde la justicia ambiental”
 - **Fondo Colaboración Universidad de Aysén - Universidad de Chile** “Expresiones territoriales, económicas y socioculturales de la pobreza energética en la Región de Aysén”
 - **Proyecto PAPILA (GA 777544)** en el marco del programa H2020 de la Unión Europea
 - **Proyecto AQ-WATCH (870301)** en el marco del programa Investigación e Innovación de la Unión Europea
- ### Participantes Talleres multi-actor (Metálogos)
- Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo (AIFBN)
 - Aysén Reserva de Vida
 - Comité Nacional pro-defensa de la flora y fauna (CODEFF)
 - LANARQ
 - Consejo de la Sociedad civil (COSOC)
 - Colegio de Arquitectos, Valdivia
 - Fundación para la Superación de la Pobreza
 - Ilustre Municipalidad de Valdivia
 - Ilustre Municipalidad de Coyhaique
 - Ilustre Municipalidad de Chile Chico
 - Ilustre Municipalidad de Cochrane
 - Ilustre Municipalidad de Padre Las Casas
 - Corporación Nacional Forestal (CONAF) de Aysén
 - Corporación Nacional Forestal (CONAF) de La Araucanía
 - Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), Aysén
 - Instituto Forestal, Los Ríos
 - Instituto Forestal, Aysén
 - Sistema Nacional de Certificación de Leña (SNCL)
 - Gobierno Regional de Aysén
 - Mesa por la Descontaminación de Coyhaique
 - Seremi de Energía, Los Ríos
 - Seremi de Energía, Aysén
 - Seremi del Medio Ambiente, Aysén
 - Seremi del Medio Ambiente, La Araucanía
 - Seremi de Salud, Aysén
 - Seremi de Vivienda y Urbanismo, Aysén
 - Seremi de Vivienda y Urbanismo, Los Ríos
 - SERVIU, Aysén
 - SERVIU, Los Ríos
 - Universidad de La Frontera
 - Universidad Católica de Temuco
 - INACAP Valdivia
 - Universidad Austral de Chile – Campus Isla Teja
 - Centro de Estudios Ambientales (CEAM) – UACH
 - Certificación e Investigación de la Vivienda Austral (CIVA) – UACH
 - Universidad de Aysén
 - INACAP Coyhaique
 - Universidad Austral de Chile – Campus Patagonia
 - Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP)

Referencias

Amigo, C. (2019). Cultura y vulnerabilidad energética territorial: el problema de la contaminación en Coyhaique. Tesis para optar al grado de Magíster en Análisis Sistémico Aplicado a la Sociedad. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Araya-Muñoz, D., Metzger, M. J., Stuart, N., Wilson, A. M. W., & Carvajal, D. (2017). A spatial fuzzy logic approach to urban multi-hazard impact assessment in Concepción, Chile. *Science of the Total Environment*, 576, 508-519.

Boyce, J. K., Zwickl, K., & Ash, M. (2016). Measuring environmental inequality. *Ecological Economics* 124, pp. 114-123.

Brulle, R. J., & Pellow, D. N. (2006). Environmental justice: human health and environmental inequalities. *Annual Review of Public Health* 27, 103-24.

CASEN (Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional) (2013). Encuesta CASEN 2013. Santiago, Chile: Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

CASEN (Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional) (2015). Encuesta CASEN 2015. Santiago, Chile: Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

CASEN (Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional) (2017). Encuesta CASEN 2017. Santiago, Chile: Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

CDT (Corporación de Desarrollo Tecnológico) (2015). Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera. Santiago, Chile: Ministerio de Energía.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2004). Población, Envejecimiento y Desarrollo. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/13059/S044282_es.pdf?sequence=1

CONAF (Corporación Nacional Forestal) (2017). Diagnóstico de medios, estándares y actores involucrados en el proceso de comercialización de leña, en el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV). Santiago, Chile: Corporación Nacional Forestal

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2004). Población, Envejecimiento y Desarrollo. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/13059/S044282_es.pdf?sequence=1

Covid-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University Disponible en: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>

Das K., & Das Chatterjee, N. (2020). Examine the impact of weather and ambient air pollutant parameters on daily case of COVID-19 in India. DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.06.08.20125401>

EEA (European Environment Agency) (2016). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016 - Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories. EEA Report No 21/2016.

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: Informe extendido y anexos. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia para el Ministerio del Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants (SNAP), 116 pp. Disponible en: <http://www.cr2.cl/carbononegro/>.

Referencias

Galvin, R. (2014). Making the “rebound effect” more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the “energy savings deficit” and the “energy performance gap.” *Energy and Buildings*, 69, 515-524. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.004>

Galvin, R., & Sunikka-Blank, M. (2016). Quantification of (p)rebound effects in retrofit policies - Why does it matter? *Energy*, 95, 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.034>

Garreaud, R., & Rutllant, J. (2006). Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica en Santiago. Capítulo 2 Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago, R. Morales y C. Gonzalez, Ed. Colección de Química Ambiental, Editorial Universitaria, pp. 36-53.

Gayo, E.M., McRostie, V.B., Campbell, R., Flores, C., Maldonado, A., Uribe-Rodriguez, M., Moreno, P.I., Santoro, C.M., Christie, D.A., Muñoz, A.A., & Gallardo, L. (2019). Geohistorical records of the Anthropocene in Chile. *Elementa: The Science of the Anthropocene* 7, 15.

GBD (Global Burden Disease) (2019). Diet Collaborators. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*; 393(10184):1958-1972. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)30041-8.

Gómez L., Gallardo L., Nicolas H., & Boisier J. (2018). Synoptic Conditions Associated to Extreme Concentrations of Fine Particles (PM_{2.5}) in Coyhaique, Chilean Patagonia; Conference: School of Atmospheric Measurements in Latin America and the Caribbean: Atmospheric Particles and Reactive Gases (SAMLAC).

INFOR (Instituto Forestal) (2019). Base de datos no publicada. Sistema nacional de monitoreo del consumo de leña y otros biocombustibles sólidos.

IPCC (2006). Methodological choice and identification of key categories. En H.S. Eggleston, L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa, Japan: The National Greenhouse Gas Inventories Program.

Labraña, J., Folchi, M., Urquiza, A., & Rivas, M. (2020). Historia sociocultural de la contaminación atmosférica en Santiago, Chile. Construcción del problema, 1961-1978. Historia y contaminación social (en revisión).

Landigran, P. et al. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet* 391: 462-512.

Laurent, É. (2011). Issues in environmental justice within the European Union. *Ecological Economics* 70, pp. 1846-1853.

Maddison Project Database, version 2018. Bolt, Jutta, Robert Inklaar, Herman de Jong and Jan Luiten van Zanden (2018), “Rebasing ‘Maddison’: new income comparisons and the shape of long-run economic development”, Maddison Project Working paper 10.

Mazzeo, A., Huneeus, N., Ordoñez, C., Orfanoz-Cheuquelaf, A., Menut, L., Mailler, S., Valari, M., van der Gon, H. D., Gallardo, L., Muñoz, R., Donoso, R., Galleguillos, M., Ossesa, M., & Tolvett, S. (2018). Impact of residential combustion and transport emissions on air pollution in Santiago during winter, *Atmos. Environ.*, 190, 195–208, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.043>.

Menares, C., Gallardo, L., Kanakidou, M., Seguel, R., & Huneeus, N. (2020). Increasing trends (2001-2018) in photochemical activity and secondary aerosols in Santiago, Chile. Aceptada para publicación en *Tellus B*.

Referencias

MMA (Ministerio del Medio Ambiente), Gobierno de Chile. (2019). Quinto Reporte del Estado Medio Ambiente. Recuperado de: <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/>

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., & Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756.

Muñoz, A.A., Klock-Barría, K., Sheppard, P.R., Aguilera-Betti, I., Toledo-Guerrero, I., Christie, D.A., Gorena, T., Gallardo, L., González-Reyes, Á., Lara, A., Lambert, F., Gayo, E., Barraza, F., & Chávez, R.O. (2019). Multidecadal environmental pollution in a mega-industrial area in central Chile registered by tree rings. *Science of The Total Environment* 696, 133915.

OMS (Organización Mundial de la Salud) (2015). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Ginebra, Suiza.

RedPE (Red de Pobreza Energética) (2019). Acceso equitativo a energía de calidad en Chile. Hacia un indicador territorializado y tridimensional de pobreza energética. Disponible en: <http://redesvid.uchile.cl/pobreza-energetica/>

RedPE (Red de Pobreza Energética) (2020). Caracterización del Mercado de la Leña en Chile y sus barreras para la transición energética. Documento de Trabajo. Disponible en: www.pobrezaenergetica.cl

Reyes, R. (2017). Consumo de combustibles derivados de la madera y transición energética en la Región de Los Ríos, periodo 1991-2014. En: Informes Técnicos BES, Bosques - Energía - Sociedad, Año 3. N° 6. Enero 2017. Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM. Instituto Forestal, Chile. p. 20

Reyes, R., Sagardía, R., & Schueftan A. (2018). Consumo de combustibles derivados de la madera y transición energética en la Región del Maule. En: Informes técnicos BES, Bosques - Energía - Sociedad, Año 4. N° 8. Enero 2018. Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM. Instituto Forestal, Chile. p. 24.

Reyes, R., Schueftan, A., Ruiz, C., & González, A. D. (2019). Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses? *Energy Policy*, 124(April 2018), 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.022>

Reyes, R., Sanhueza, R., & Schueftan, A. (2020). Consumo de combustibles derivados de la madera en la región de O´ Higgins: El desconocido rol de frutales y viñas en el abastecimiento regional de energía. En: Informes técnicos BES, Bosques - Energía - Sociedad, Año 6. N° 11. Enero 2020. Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM. Instituto Forestal, Chile. 17 p.

Román, B., & Lozada, P. (2016). Encadenamientos productivos de leña y madera nativa en las regiones de Los Ríos y Los Lagos y propuestas para su desarrollo 2016: Metodología participativa para el análisis de encadenamientos productivos: el caso de la leña en el sur de Chile. Valdivia, Chile: AIFBN

Rutllant, J., & Garreaud, R. (1995). Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: Towards an objective episode forecasting. *Environ. Monit. Assess.* 34, 223-244, <https://doi.org/10.1007/BF00554796>.

Referencias

Schueftan, A., Sommerhoff, J., & González, A. D. (2016). Firewood demand and energy policy in south-central Chile. *Energy for Sustainable Development*, 33, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.004>.

Seguel, R. J., Gallardo, L., Osses, M., Rojas, N., Landulfo, E., Andrade, M. de F., Nogueira, T., Rondanelli, R., Huneus, N., Menares, C., Fleming, Z. L., Mangones, S., Eskes, H., Belalcázar, L. C., Rojas, J., Ibarra-Espinosa, S., Munizaga, M., Pantoja, N., Carrasco, P., Krejci, R., Stein, D., Morais, F. G., Yoshida, A. C., Leiva, M., Toro, R., & Moreira, G. A. (2020). Primary and secondary air pollutant response during the COVID-19 lockdown in South American Megacities: learning about present and future air quality (En preparación)

Taylor, KE, Stouffer, R.J., & Meehl, GA. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull Amer Meteor Soc* 93(4): 485–498. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

Travaglio M., Yu, Y., Popovic, R., Selley, L., Santos Leal, N., & Martins, L. M. (2020). Links between air pollution and COVID-19. DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067405>

UACH (Universidad Austral de Chile) (2013). Evaluación del mercado de biomasa y su potencial: Estimación de superficie disponible para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas. Santiago, Chile: Ministerio de Energía y Corporación Nacional Forestal.

Urquiza, A., Labraña, J., Billi, M., & Arrieta, D. (2020). La contaminación atmosférica como problema en la opinión pública: tematización del periódico El Mercurio y su relación con la investigación científica y las decisiones políticas sobre la polución en la Región Metropolitana. *Revista Latina de Comunicación Social* (en preparación)

von Gunten, L., Grosjean, M., Eggenberger, U., Grob, P., Urrutia, R., & Morales, A. (2009). Pollution and eutrophication history AD 1800–2005 as recorded in sediments from five lakes in Central Chile. *Global Planet Change* 68, 198-208.

Wang, J., Tang, K., Feng, K., Lin, X., Lv, W., Chen, K. and Wang, F. (2020). High Temperature and High Humidity Reduce the Transmission of COVID-19. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3551767> o <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3551767>

WHO (World Health Organization) Regional Office for Europe. (2013). Health risks of air pollution in Europe HRAPIE project. Copenhagen, Denmark. Recuperado de: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/238956/Health_risks_air_pollution_HRAPIE_project.pdf

Wu X., Nethery, R.C., Sabath, B.M., Braun, D., & Dominici, F. (2020). Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>.

Altura geopotencial: Elevación de un nivel de presión atmosférica determinado. Es una métrica usual en meteorología para describir los sistemas, gradientes y cambios de presión en altura.

Arraigo cultural: Fenómeno colectivo de afianzamiento de saberes y prácticas cotidianas que, a través del tiempo, llegan a ser considerados normales y propios.

Artefactos a leña: Equipos de combustión, principalmente domiciliarios, utilizados para producir energía térmica con el propósito de climatización de las viviendas y satisfacción de confort térmico. También se asocian a otros usos domésticos, como cocción de alimentos, agua caliente y secado de ropa

Baja costera: Zona o centro, localizado al oeste de la cordillera, de baja presión en superficie relativa a la condición en la región (de gran escala). Cuando estos centros toman una forma alargada también se conocen como vaguada costera.

Bases Generales del Medio Ambiente: Normativa promulgada el 1 de marzo de 1994 que establece un marco general de regulación del derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.

Capa de mezcla: Nivel inferior de la atmósfera donde se concentran y mezclan la mayor parte de los contaminantes emitidos en superficie, usualmente limitada en altura por una capa de inversión térmica de alta estabilidad.

Cargas Ambientales: Actividades que afectan negativamente el medioambiente, o bien, las consecuencias de tales actividades que puedan generar contaminación ambiental, riesgos ambientales, o la degradación o uso de recursos naturales.

Causas cardiopulmonares: Causas de muerte o enfermedad que de acuerdo a la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10) corresponden a enfermedades del sistema circulatorio (I00-I99) y del sistema respiratorio (J00-J99).

Causas cardiovasculares: En general, hace referencias a las causas originadas por las enfermedades del sistema circulatorio. Dentro de estas, podemos encontrar: infarto agudo al miocardio, accidente vascular encefálico, crisis hipertensiva, arritmia grave, entre otras enfermedades circulatorias.

CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5): Marco colaborativo para el estudio y la comparación de salidas de modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera. Los resultados del trabajo contribuyeron al quinto informe de evaluación del cambio climático del IPCC.

Columna atmosférica: Integración vertical de moléculas (ej. NO₂) por unidad de área desde la superficie hasta el tope de la atmósfera.

Comercializadores de Leña: Intermediarios responsables de que la leña se distribuya desde los productores hasta los consumidores. Aquí caben transportistas minoristas, mayoristas y leñerías. En ocasiones, la producción y comercialización pueden ser realizadas por un mismo actor.

Comorbilidad: Enfermedad que una persona puede tener. Por ejemplo, frente a la pandemia de COVID-19, algunas enfermedades que han sido relevantes para definir grupos de riesgo son: diabetes mellitus, hipertensión y obesidad entre otras.

Compuesto de anomalías: Estado particular de una variable (ej. temperatura) respecto de una condición promedio, para un conjunto de casos asociado a un fenómeno (ej. episodios de alta contaminación).

Condición sinóptica: Patrón de gran escala que da cuenta del estado de la atmósfera en un momento determinado.

Confort térmico: Estado mental y corporal en el que una persona se encuentra satisfecha con la temperatura del ambiente en el que se encuentra, sin requerir de mayor o menor temperatura. La sensación de confort térmico está mediada por percepciones culturales que definen niveles aceptables de frío y calor, estableciendo umbrales mínimos y máximos de tolerancia, los que son altamente variables y se encuentran estrechamente vinculados a condiciones socioculturales.

Consumidores de Leña: Actores que consumen la leña. Pertenecen, en su mayoría, al sector residencial.

Contaminante primario: Contaminante atmosférico emitido directamente desde una fuente.

Contaminante secundario: Contaminante atmosférico que no es emitido directamente desde una fuente, sino que se forma en la atmósfera a partir de precursores.

Contaminantes criterio: Conjunto de contaminantes que afectan la calidad del aire y que, generalmente, son monitoreados. Estos contaminantes son: material particulado, óxidos de nitrógeno (NO_x), plomo (Pb), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3) a nivel de superficie.

COVID-19: Enfermedad producida por el virus SARS-CoV-2, conocido como coronavirus.

Cuerpo normativo directo: Marco legal que regula la leña por su condición orgánica, por su calidad de vegetación, de árbol, e inserta y traduce esta categoría al sistema jurídico.

Cuerpo normativo indirecto: Marco legal que se refiere a la normatividad de la leña solo respecto de los efectos de su utilización y colisión con otros bienes jurídicos, particularmente aquellos que dicen relación con la vida, la salud y el medio ambiente.

Cuerpos normativos de institucionalidad: Marcos legales que se enfocan en el establecimiento de un aparato institucional que sea capaz de operativizar distintos reglamentos y no en la naturaleza de la leña ni sus efectos.

Cuerpos normativos híbridos: Marcos legales que, por un lado, consideran a la leña en su naturaleza orgánica (principalmente a través de su relación con el derecho de propiedad) y, por otro, regulan la leña con ocasión de los efectos en su utilización y/o colisión con otros derechos dentro del tráfico jurídico (siendo asimilado su tratamiento como combustible sólido).

Deciles: Medida que divide en 10 grupos una característica que se mide cuantitativamente; cada uno corresponde a un 10 % del total y se ordena de menor a mayor, donde el primer grupo tiene los valores más bajos y el décimo, los más altos.

Efecto rebote: Disminución en el consumo energético de menor magnitud que la esperada bajo condiciones ideales de eficiencia energética, debido a condiciones preexistentes diferentes a las modeladas o por la presencia de una relación de elasticidad entre el consumo energético y la eficiencia energética distinta de 1.

Episodios de Alerta: Categoría de episodio crítico donde la concentración de 24 horas de MP_{10} está entre 195 y 239 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para $\text{MP}_{2,5}$ está entre 80 y 109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Episodios de Emergencia: Categoría de episodio crítico donde la concentración de 24 horas de MP_{10} es superior o igual a 330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para $\text{MP}_{2,5}$ es superior o igual a 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Episodios de Preemergencia: Categoría de episodio crítico donde la concentración de 24 horas de MP_{10} está entre 240 y 329 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para $\text{MP}_{2,5}$ está entre 110 y 169 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Era Común: Concepto temporal que se utiliza en las reconstrucciones paleoambientales e históricas para indicar los años después de Cristo (d. C.).

ERA5 (Reanálisis de quinta generación del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio, ECMWF): Reanálisis es un método científico en el que se combinan observaciones y modelos numéricos (que simulan uno o más aspectos del sistema Tierra) para generar bases de datos globales, consistentes y continuas con la historia de la evolución reciente de la atmósfera, océanos y superficie terrestre. ERA5 es el más reciente reanálisis del ECMWF y entrega la evolución de parámetros atmosféricos para cada hora desde 1970.

Especiación química de material particulado: Análisis que permite identificar la composición química del material particulado.

Estabilidad atmosférica: Capacidad de la atmósfera para generar movimientos verticales de masas de aire. A mayor estabilidad, menor es la dispersión vertical de contaminantes.

Exposición aguda: Concentración promedio de 24 horas de un contaminante específico a la que ha sido expuesta la población de un lugar determinado.

Exposición crónica: Concentración promedio anual de un contaminante específico a la que ha sido expuesta la población de un lugar determinado.

Forzante de cambio climático: Agentes naturales (ej. cambios en la radiación solar) o de origen antrópico (ej. aumento de los gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles) que modifican el clima.

Fotoquímica: Interacción entre átomos y moléculas con la radiación electromagnética.

Gestión de episodios críticos: Medida para la gestión de episodios de contaminación por $MP_{2,5}$ y/o MP_{10} que se consideran críticos por los niveles de concentración de contaminación que se alcanzan.

Índice de polución: Parámetro que permite representar variaciones temporales para determinados contaminantes, cuyos valores absolutos se han obtenido a partir de diferentes fuentes de información. Se calcula

agregando los promedios de los valores normalizados para cada contaminante para un determinado intervalo temporal.

Índice de vejez comunal: Proporción de personas mayores, es decir, personas de 65 años o más del total poblacional.

Índice global de sensibilidad (a la contaminación): Índice que mide la susceptibilidad de la población a ser afectada por la contaminación del aire, calculado a escala comunal a partir de tres factores: edad (población entre 0 y 4 años, y población con 65 años o más), salud (autorreporte de enfermedades crónicas y agudas) y pobreza multidimensional, estandarizados a través del método de pertenencia difusa, considerando una función lineal (*fuzzy membership*) e integrados con el método de superposición difusa (*fuzzy overlay*). La sensibilidad en conjunto con la capacidad de respuesta definen la vulnerabilidad de la población frente a una amenaza que, en este caso particular, corresponde a la contaminación atmosférica.

Inventario de Emisiones: Base de datos que entrega flujos de emisión para diferentes contaminantes y los sectores responsables de esas emisiones. Estas emisiones pueden presentarse desagregadas en el espacio en grillas regulares o agregadas en algún nivel de ordenamiento territorial (comuna, región, país, etc.). Adicionalmente, las emisiones se pueden entregar como totales anuales o con mayor nivel de resolución temporal (horaria, diaria, semanal, etc.).

Justicia Ambiental: Concepto que hace referencia a la distribución equitativa de los beneficios y consecuencias derivados de la utilización de recursos naturales tales como el agua y el aire.

Letalidad: Número de defunciones que ocurren en el total de enfermos. Se expresa, generalmente, en porcentaje. A diferencia de la mortalidad, es una proporción que expresa cuántas personas mueren de una enfermedad del total de enfermos y no del total poblacional.

Material Particulado (MP): Partículas sólidas y líquidas en suspensión en el aire. Aquellas partículas que tienen un diámetro menor a 2,5 micrómetros (μm) se les denomina como $\text{MP}_{2,5}$ y se les conoce también como material particulado fino. De la misma manera, aquellas partículas de diámetro menor a 10 μm se llaman MP_{10} y se les conoce también como material particulado grueso. El MP_{10} contiene al $\text{MP}_{2,5}$.

Modelo: Representación, comúnmente cuantitativa, que resume e intenta reproducir las dinámicas principales del funcionamiento de un sistema.

Modelo empírico: Modelos parcial o totalmente basados en relaciones estadísticas entre variables.

Modelos Globales de Clima: Modelos numéricos complejos que caracterizan distintos procesos del sistema climático y la interacción entre ellos.

Morbilidad: Sinónimo de enfermedad

Morbimortalidad: Concepto que permite englobar tanto las muertes como las enfermedades.

Muertes prematuras: Deceso que ocurre antes de cumplir la expectativa de vida de un país. En Chile, la expectativa o esperanza de vida es de 79,9 años, por lo que cualquier muerte anterior a esa edad se considera una muerte prematura.

Multifuncionalidad: Capacidad de un instrumento para desempeñar diversas funciones.

Naturaleza dendroenergética: Refiere específicamente al reconocimiento de la leña en su condición orgánica, como un producto combustible obtenido directamente del medio natural.

Pellet de madera: Fuente de energía elaborada a partir del prensado de aserrín o virutas de madera. Es un combustible seco que produce menos emisiones de $\text{MP}_{2,5}$ que la leña.

Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica: Instrumentos de gestión ambiental que tienen por objetivo reducir los niveles de contaminación del aire para resguardar la salud de la población mediante la implementación de medidas y acciones específicas.

Pobreza energética: Hogares con falta de acceso equitativo a servicios energéticos de alta calidad para satisfacer sus necesidades básicas y fundamentales de energía.

Pobreza multidimensional: Medida que hace referencia al grado de carencia que puede tener un hogar en dimensiones como educación, salud, trabajo y seguridad social; adicionalmente, se han agregado dimensiones como vivienda y su entorno, y las redes y cohesión social. En Chile, el levantamiento de este índice se realiza a través de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN).

Productores de Leña: Trabajadores y propietarios asociados a predios que se dedican a la producción de leña.

Productos dendroenergéticos: Productos derivados de la biomasa, ya sea de recursos forestales o desechos agroforestales utilizados como fuentes de energía para cocción y calefacción, entre otros usos.

RCP8.5: Uno de los cuatro escenarios definidos por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para representar la evolución futura de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) desde el presente hasta el año 2100. Entre los cuatro escenarios, este representa el de mayor aumento de concentraciones de GEI para finales de siglo. En este escenario, el balance energético positivo es de 8.5 w/m^2 respecto a niveles preindustriales.

Registros sedimentarios: Depósitos que se acumulan secuencialmente en sistemas que reciben aportes sedimentarios. Por ejemplo, los **registros lacustres** corresponden a sedimentos que se han depositado en el fondo de los lagos.

Sensibilidad climática: Respuesta climática frente a una forzante determinada. En el contexto del cambio climático antrópico, suele referirse específicamente al aumento esperado en la temperatura media de la Tierra si se dobla la concentración atmosférica de CO₂. Su valor, estimado en torno a los 3 °C, tiene un grado de incertidumbre importante en modelos de clima contemporáneos.

Simulaciones numéricas: Conjunto de cálculos matemáticos que reproducen procesos físicos y/o químicos que ocurren en la atmósfera.

Subsidencia (atmosférica): Viento vertical o movimiento de masas de aire desde un nivel determinado a uno inferior.

Tasa de incidencia: Número de enfermos de una población en un tiempo y lugar determinado. En el caso de COVID-19, el total de enfermos está definido por el total de pacientes confirmados por COVID-19, es decir, con examen de PCR positivo. El total de personas es obtenido desde los registros del Instituto Nacional de Estadística (INE)

Tasa de mortalidad: Número de defunciones de una población en un tiempo y lugar determinado. En el caso de COVID-19, el total de defunciones está definido por lo que indica el certificado de defunción emitido por el Servicio de Registro Civil de Chile y que posteriormente es validado por el Departamento de Estadísticas e Información en Salud (DEIS); el total poblacional corresponde a lo reportado por las estadísticas del INE.

Testigos de hielo: Muestras cilíndricas de hielo que se obtienen mediante la perforación de glaciares o capas de hielo a diferentes profundidades. Por medio de la caracterización de la composición química de las diferentes láminas de hielo, es posible inferir variaciones en las condiciones climáticas y ambientales en el curso de largos intervalos temporales.

Transición energética: Políticas o acciones que apuntan a la transformación de los sistemas energéticos, reemplazando fuentes energéticas fósiles por fuentes de energía renovables.

Transición energética multimodal: Reducción del uso de combustibles fósiles a partir de la incorporación de diversas fuentes de energía renovable, considerando las condiciones del territorio.

Umrales de confort térmico: Umrales mínimos y máximos de tolerancia respecto de la sensación de confort térmico. Están mediados por percepciones socioculturales que definen niveles aceptables de frío y calor, los que son altamente variables en la satisfacción de las personas con el ambiente térmico.

Variabilidad sinóptica: Variabilidad atmosférica de alta frecuencia (típicamente periodos menores a diez días).

Variación estacional: Fluctuación en las condiciones climáticas y/o ambientales que ocurren periódicamente debido a los cambios de las estaciones del año (verano versus invierno).

Vulnerabilidad energética territorial: Falta de capacidad de un territorio para garantizar acceso equitativo —en calidad y cantidad— a servicios resilientes que permitan el desarrollo humano y económico sostenible de su población. Es decir, la existencia de brecha de acceso en la satisfacción de las necesidades de su población (ya sea en términos de calidad o cantidad) o inequidad en dicho acceso; o bien, la existencia de significativos riesgos siconaturales que lo hacen incapaz de garantizar una provisión sostenible y resiliente de estos servicios.



(CR)² | Center for Climate
and Resilience Research

 www.cr2.cl

 [@cr2_uchile](https://twitter.com/cr2_uchile)

 [@cr2uchile](https://www.facebook.com/cr2uchile)

 comunicaciones.cr2@dgf.uchile.cl

 (+562) 2978 4446

 Blanco Encalada 2002, 4to piso. FCFM - Universidad de Chile

