



El presente documento es la traducción del documento “Air quality, health and economic impacts of the Ventanas coal-fired complex”, escrito originalmente en idioma inglés, elaborado por CREA, (Centre for Research on Energy and Clean Air, CREA) y dice lo siguiente:

Impactos económicos, a la calidad del aire y a la salud del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas: 2013 a 2020

Erika Uusivuori
Dr. Jamie Kelly
Vera Tattari
Kaiyu Chen

11/2024



CREA es una organización de investigación independiente centrada en revelar las tendencias, las causas y los impactos en la salud, así como las soluciones a la contaminación del aire.

Impactos económicos, a la calidad del aire y a la salud del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas: 2013 a 2020

Noviembre de 2024

Autores

Erika Uusivuori, Dr. Jamie Kelly, Vera Tattari, Kaiyu Chen

Editora

Hannah Ekberg

Contribuidora

Dra. Mercedes Lu

Traductora

Carla Mendoza

Diseñadora

Wendi Wu

Reconocimientos

CREA agradece el apoyo, los comentarios y las opiniones recibidos de Miguel Fredes del Programa Defensoría Climática y del Dr. Mark Chernaik de ELaw.

Las opiniones expresadas en este informe son las de los autores y no deben atribuirse a ninguna de las personas anteriores.



Acerca de CREA

El Centro de Investigación en Energía y Aire Limpio (CREA) es una organización de investigación independiente centrada en revelar las tendencias, las causas y los impactos en la salud, así como las soluciones a la contaminación del aire. CREA utiliza datos científicos, investigación y evidencia para respaldar los esfuerzos de gobiernos, empresas y organizaciones de campaña de todo el mundo por avanzar hacia la energía limpia y el aire limpio, ya que creemos que la investigación y la comunicación efectivas son las claves para que tengan éxito las políticas, las decisiones de inversión y los esfuerzos de promoción. CREA fue fundada en Helsinki y cuenta con personal en varios países asiáticos y europeos.

Descargo de responsabilidad

CREA es políticamente independiente. Las denominaciones empleadas en el presente informe y la manera en que se presentan los datos que figuran en los mapas no implican la expresión de juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o áreas, ni de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

Impactos económicos, a la calidad del aire y a la salud del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas: 2013 a 2020

Conclusiones principales

- Este informe evalúa la manera en que las emisiones del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas han afectado la calidad del aire, la salud pública y la economía durante su funcionamiento entre el 2013 y el 2020.
- Hemos encontrado que el complejo empeora significativamente la contaminación del aire, la salud pública y la economía, especialmente en la zona circundante a las localidades de Quintero y Puchuncaví.
- Se encontraron contaminantes como $PM_{2,5}$, NO_2 y SO_2 con altas concentraciones en los alrededores de Puchuncaví, pero que además afectaban zonas hasta a 300 km de distancia, incluida la capital de Chile, Santiago.
- Durante el período de ocho años, del 2013 al 2020, la contaminación del complejo Ventanas se asoció con 563 (432-702) muertes, 1.117 (164-253) consultas de urgencias por asma, 575 (40-224) nacimientos de niños con bajo peso, 238 (675-1.555) nacimientos prematuros, 129 (151-1.269) años vividos con discapacidad y más de 300.000 (260.832-352.044) días de ausencias laborales.
- La carga económica acumulada ascendió a un estimado de USD 1.400 (1.100–1.800) millones, equivalente a CLP 1,3 (1,01–1,8) billones.

Índice

Contenido

Conclusiones principales.....	3
Índice	4
Introducción	5
Complejo termoeléctrico de carbón Ventanas.....	5
Investigación de las Naciones Unidas	5
Principio de quien contamina paga (PPP).....	6
Impactos de la contaminación del aire sobre la salud humana y los costos económicos....	6
Resultados	9
Niveles ambientales de contaminación.....	9
Impacto anual de la contaminación en la salud y la economía.....	10
Impacto acumulado de la contaminación en la salud y la economía.....	14
Conclusiones	16
Metodología.....	17
Emisiones contaminantes	17
Modelación atmosférica (CALPUFF)	17
Evaluación de impacto en la economía y la salud	18
Referencias.....	23

Introducción

Complejo termoeléctrico de carbón Ventanas

El complejo termoeléctrico de carbón Ventanas es una central termoeléctrica de carbón de 544 megawatts (MW) ubicada en Puchuncaví, en la Región de Valparaíso, Chile. Actualmente, cuenta con dos unidades activas, las unidades 3 y 4, cada una con una capacidad de 272 MW, mientras que sus unidades 1 y 2 más antiguas fueron retiradas de servicio el 2020 y el 2023, respectivamente (GEM, 2024). La unidad 3 también es conocida como Nueva Ventanas y la unidad 4, como Campiche. A pesar de su papel en la generación de energía de la región, es un contribuyente importante a la contaminación del aire, con graves implicaciones para la salud pública y el medio ambiente en la zona costera de Puchuncaví y la cercana ciudad portuaria de Quintero (en adelante, "Quintero-Puchuncaví").

Como zona de sacrificio se entiende una zona donde los residentes enfrentan consecuencias devastadoras para la salud física y mental debido a que viven en puntos críticos de contaminación (Lerner, 2012). Desde hace años, Quintero-Puchuncaví ha sido reconocida como la zona de sacrificio más destacada de Chile, principalmente debido al Complejo Industrial Ventanas, que alberga 12 grandes instalaciones, entre otras, refinerías de petróleo, plantas petroquímicas, centrales termoeléctricas de carbón y terminales de gas (Triozi, 2023). Esta concentración de la actividad industrial, que lleva décadas, ha provocado una degradación ambiental importante y violaciones de los derechos humanos, ya que los residentes sufren una exposición constante a contaminantes tóxicos, año tras año (GEM, 2024).

Investigación de las Naciones Unidas

Durante el 2023, el Dr. David Boyd, relator especial de la ONU sobre derechos humanos y medio ambiente, visitó Chile, incluida la central termoeléctrica Ventanas y las comunidades locales (Boyd, 2023). Durante su visita, identificó diversos problemas de salud que padece la población de Quintero-Puchuncaví que están relacionados con factores ambientales, entre otros, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y una alta tasa de mortalidad infantil. Señaló que los habitantes de Quintero-Puchuncaví están expuestos a niveles inaceptables de contaminación que ponen en peligro su salud y esperanza de vida, lo que lo llevó a concluir que esta zona de sacrificio está en conflicto directo con los objetivos del desarrollo sostenible, ya que comprometen el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

Además, afirmó que las medidas para abordar la contaminación en las zonas de sacrificio de Chile siguen siendo "demasiado lentas" y "no cumplen con las obligaciones de derechos humanos del país". Esto se refleja en el Informe mundial de la calidad del aire 2022, que

muestra que ocho ciudades chilenas se encuentran entre las 15 ciudades más contaminadas de América Latina y el Caribe.

El informe del Dr. David Boyd hace hincapié, además, en que las leyes y las regulaciones ambientales de Chile adolecen de lagunas y deficiencias críticas. El informe del relator señala que, “en cuanto a la calidad del aire, al menos ocho de las normas de Chile son considerablemente más indulgentes que las de la Organización Mundial de la Salud (OMS), aunque algunas están siendo revisadas. La norma anual de materia particulada fina de Chile (PM_{2,5}) se fija en 20 µg/m³, cuatro veces superior a la pauta de la OMS. El límite anual de dióxido de nitrógeno se fijó recientemente en 40 µg/m³, lo que sigue siendo cuatro veces superior a la recomendación de la OMS. La norma de dióxido de azufre (SO₂) es de 150 µg/m³, mientras que la OMS recomienda un nivel de 24 horas de 40 µg/m³” (pág. 4).

Principio de quien contamina paga (PPP)

La Corte Suprema de Chile dictaminó en mayo del 2023 que el plan de prevención y control de la contaminación del aire para Quintero-Puchuncaví violaba varios principios ambientales fundamentales, entre ellos, el principio preventivo, el principio de quien contamina paga (PPP por sus siglas en inglés) y el principio de progresividad (Boyd, 2023). La corte le ordenó al gobierno mejorar los estándares de calidad del aire de acuerdo con las pautas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicadas en el 2021 y elaborar una norma que regule los compuestos orgánicos volátiles en un plazo de tres años (Boyd, 2023).

El principio de quien contamina paga (PPP), introducido originalmente por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en 1972, responsabiliza a los que contaminan de los daños ambientales y los obliga a asumir los costos de prevención, mitigación y restauración (OCDE, 2008). Este principio es fundamental para la política ambiental y el desarrollo sostenible en todo el mundo, con el fin de garantizar que los que contaminan no solo rindan cuentas de los beneficios de sus actividades, sino también de los daños que imponen al medio ambiente y a la salud pública. En Chile, la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300) de 1994 consagra el PPP, que les exige a las empresas que asuman los costos asociados con el daño ambiental a través de sistemas como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) (Ley Chile, 1994; OCDE, 2016).

Impactos de la contaminación del aire sobre la salud humana y los costos económicos

Los desafíos ambientales de Chile van más allá de la contaminación del aire, ya que el país es sumamente vulnerable a los impactos del cambio climático. El empeoramiento de las sequías, la desertificación, los incendios forestales, las olas de calor mortales, el aumento del

nivel del mar, la erosión costera y los fenómenos meteorológicos extremos cada vez más intensos amenazan tanto el medio ambiente como la economía. Por ejemplo, la reducción de las nevadas en la Cordillera de los Andes ha llevado a la disminución de los caudales de los ríos, niveles más bajos de los embalses y la disminución de los suministros de agua subterránea, a la vez que los glaciares en los Andes meridionales se encuentran entre los que se derriten con mayor rapidez a nivel mundial (Boyd, 2023).

La contaminación de larga data en Quintero-Puchuncaví enfatiza aún más la vulnerabilidad de Chile. A pesar de décadas de actividad industrial, aún no existe un análisis consolidado de los contaminantes en el aire, el agua y el suelo, ni alguna metodología clara para evaluar sus impactos en la salud humana. Además, se ha realizado poco seguimiento respecto a la salud de los niños que se intoxicaron en el 2011 en la escuela La Greda, y no se han establecido normas para la calidad del suelo ni para las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (Boyd, 2023). De acuerdo con los datos de calidad del aire de State of Global Air, la materia particulada fina ($PM_{2.5}$) fue responsable de 6.980 muertes prematuras en Chile durante el 2019 (HEI, 2024).

Las emisiones de las centrales termoeléctricas de carbón contribuyen a la formación de varios contaminantes atmosféricos, entre otras, las partículas finas ($PM_{2.5}$). La contaminación del aire tiene graves impactos en el medio ambiente, la salud pública y la economía mundial. La exposición a contaminantes del aire, como materia particulada ($PM_{2.5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2), afecta negativamente a casi todos los sistemas del cuerpo humano principales, incluidos el sistema respiratorio, el cardiovascular y el reproductivo, así como a órganos vitales como el cerebro, el corazón y los pulmones. Las consecuencias para la salud van desde el asma en niños y adultos, los nacimientos prematuros y con bajo peso, las ausencias laborales hasta las muertes por afecciones como cardiopatía isquémica, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón, infecciones de las vías respiratorias bajas y diabetes (Lelieveld et al., 2019; Di et al., 2017; OMS, 2021). A nivel mundial, la contaminación del aire contribuye a más de dos millones de casos de asma pediátrica (Anenberg et al., 2018), lo que provoca mil millones de días de ausencias laborales (OCDE, 2012) y causa más de seis millones de muertes al año (Lelieveld et al., 2019). Una gran parte de la contaminación del aire se origina en la combustión de combustibles fósiles, particularmente en las centrales termoeléctricas de carbón (McDuffie et al., 2021).

Los costos económicos asociados con los impactos negativos de la contaminación del aire provocada por las centrales termoeléctricas son sustanciales, incluidos los costos directos, indirectos y sociales. Estos se encuentran los gastos de atención médica, entre otros, los ingresos hospitalarios y los tratamientos médicos, así como la pérdida de productividad debido a las ausencias laborales. Estimar los impactos económicos de los problemas de salud relacionados con la contaminación del aire, a menudo, implica calcular el valor estadístico de la vida (VEV). El VEV es una estimación de los costos de daños basada en cuánto están dispuestas a pagar las personas por una reducción en el riesgo de morir por estados de salud adversos. Los métodos de estimación de los daños o de los costos “externos” asociados con

los impactos de la contaminación industrial en la salud humana, los ecosistemas, la infraestructura y el clima siguen evolucionando y cada vez son más precisos.

Este informe amplía un estudio anterior (Myllyvirta et al., 2020) que evaluó la calidad del aire, la toxicidad y los impactos en la salud de las centrales termoeléctricas de carbón en Puchuncaví-Quintero y Huasco, Chile. No obstante, este estudio actualizado se concentra solo en el complejo termoeléctrico de carbón Ventanas, que incluye Ventanas 1 y 2 (unidades 1 y 2), Nueva Ventanas (unidad 3) y Campiche (unidad 4), durante un período de ocho años (del 2013 al 2020), cuando todas las unidades estaban en funcionamiento al mismo tiempo. Además de ampliar el análisis de los impactos en la salud provocados por la contaminación de la central, también incluye una evaluación detallada de los costos económicos asociados cuando se asignan valores monetarios a los impactos en la salud.

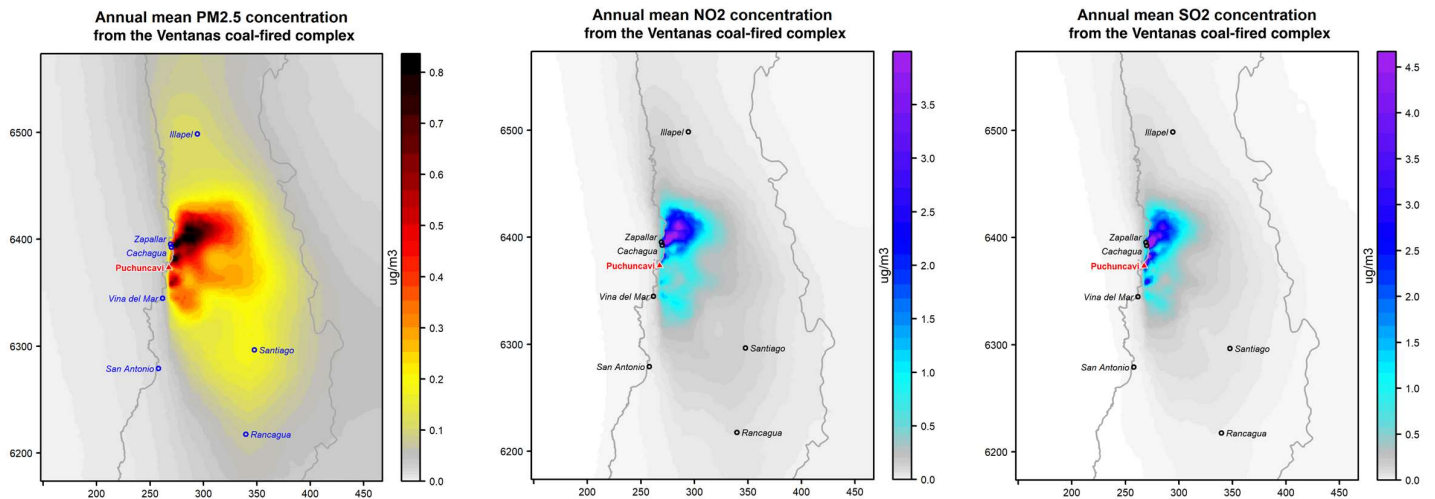
Resultados

Niveles ambientales de contaminación

Modelamos la contribución del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas según la formación de contaminantes atmosféricos ($PM_{2,5}$, NO_2 y SO_2). Para obtener esto, simulamos la manera en que las emisiones del complejo afectaron las concentraciones de contaminantes dentro de un radio de 300 km de la central. Se utilizó un modelo de contaminación del aire estándar de la industria (Exponent, 2015), que contabiliza los procesos químicos y los factores meteorológicos que afectan la dispersión de contaminantes en la atmósfera.

Las figuras 1, 2 y 3 representan las concentraciones medias anuales de $PM_{2,5}$, NO_2 y SO_2 en toda la región que rodea el complejo eléctrico. Los mapas, que abarcan un radio de 300 km, ilustran el impacto generalizado de la contaminación de la central. A menudo, el NO_2 es un precursor de la materia particulada y las zonas con altos niveles de NO_2 también presentan niveles elevados de $PM_{2,5}$ debido a las reacciones químicas en la atmósfera. Los niveles más altos de concentración de todos los contaminantes se observan en las inmediaciones de Quintero-Puchuncaví, con niveles anuales de $PM_{2,5}$ que alcanzan los $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, de NO_2 que alcanzan los $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de SO_2 que se elevan a $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El nivel anual máximo de $PM_{2,5}$ del complejo ($0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) corresponde al 16 % del valor recomendado por la OMS, que es de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la exposición anual, mientras que el nivel de NO_2 es el 35 % del límite anual recomendado de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2021).

Los tres contaminantes contribuyen a la mala calidad del aire, lo que somete a los residentes de la región de Puchuncaví a una exposición crónica que plantea riesgos importantes para la salud. La exposición crónica a niveles altos de estos contaminantes está relacionada con problemas respiratorios, problemas cardiovasculares y otros efectos a largo plazo en la salud. Dado que la $PM_{2,5}$ es más pequeña y con una mayor vida útil atmosférica, puede desplazarse mayores distancias con el tiempo, lo que afecta regiones a varios cientos de kilómetros de distancia. Nuestro análisis reveló trazas de $PM_{2,5}$ en Santiago, la capital, y en Rancagua, una ciudad a más de 200 km al sudeste de la central.



Figuras 1, 2 y 3: Media anual de concentraciones de PM_{2,5}, NO₂ y SO₂ del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas

Impacto anual de la contaminación en la salud y la economía

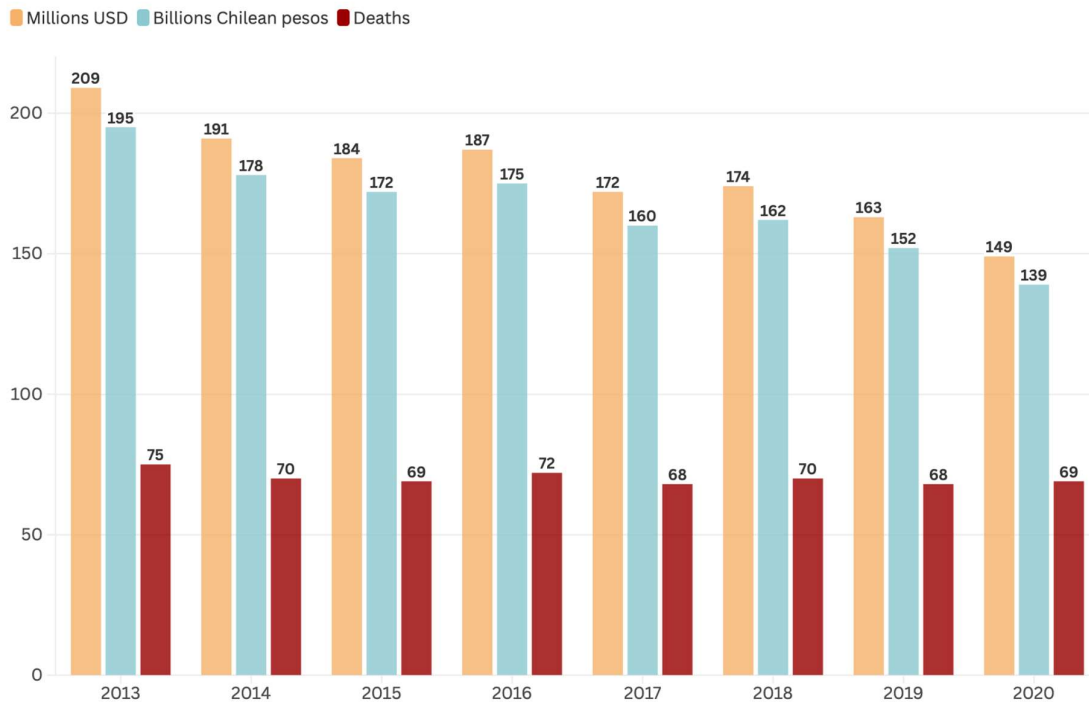
Para este estudio, calculamos la manera en que la exposición humana a contaminantes atmosféricos (PM_{2,5}, NO₂ y SO₂) del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas ha afectado la salud pública y la economía durante un período en el que estaban funcionando las cuatro unidades de la central termoeléctrica (2013-2020). El 2011 el Ministerio de Medio Ambiente de Chile estableció límites de emisiones para las centrales termoeléctricas de carbón nuevas y existentes, donde se exigía que las fuentes cumplieran con los límites de PM antes de dos años y medio a partir de la publicación del decreto, y con los límites de NO_x y SO₂ antes de cuatro años en zonas designadas como latentes o saturadas (Ministerio del Medio Ambiente, 2011). Hemos basado nuestros cálculos de los niveles de contaminantes del aire y sus efectos en la salud en los límites de emisiones establecidos. Sin embargo, las concentraciones reales de NO_x y SO₂ en Ventanas 1 en el 2014, junto con los niveles de SO₂ para Ventanas 2 y Nueva Ventanas, superaron estos límites (Snifa, 2014). Después de este período en que se exigió el cumplimiento, las concentraciones de contaminantes disminuyeron y, cuando se promediaron, se ajustaron a los límites de emisiones.

Primero presentamos los impactos anuales que la contaminación del aire ha tenido en las tasas de mortalidad humana, así como los costos económicos totales que la sociedad ha incurrido para cada año a partir del 2013 hasta el 2020 (Figura 5). Después de esto, presentamos la manera en que la contaminación ha afectado a las enfermedades no mortales

(Tabla 1). Por último, entregamos las tasas de mortalidad acumuladas y los impactos económicos totales (Figura 6), y otras consecuencias para la salud (Tabla 2) a lo largo del período de ocho años.

Encontramos que la contaminación del aire de esta central eléctrica ha tenido un gran impacto en la mortalidad. La exposición a todos los contaminantes (PM_{2,5}, NO₂ y SO₂) del complejo termoeléctrico ha contribuido a 75 (58-94) muertes en el 2013, cifra que disminuyó a 69 (53-87) muertes en el 2020. Estas muertes incluyen a adultos y niños menores de cinco años.

Annual total economic impacts and deaths 2013–2020



Source: CREA



Figura 5: Totales anuales del impacto económico y muertes (incluidos adultos y niños menores de 5 años) entre el 2013 y el 2020 por todas las causas y todos los contaminantes

Solo durante el 2020 se estima que las emisiones del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas generaron 133 (80-184) consultas de urgencia relacionadas con el asma. Esto se refiere a los casos en que las personas con asma han tenido que buscar tratamiento médico inmediato debido a síntomas graves o ataques de asma. Las partículas PM_{2,5} irritan las vías

respiratorias, lo que puede provocar ataques de asma. Los fetos, las mujeres embarazadas y los niños son particularmente vulnerables a los efectos negativos de la contaminación del aire. En consecuencia, las partículas PM_{2,5} de la central también se asocian con un estimado de 14 (4-25) nacimientos de niños con bajo peso y 26 (13-28) nacimientos prematuros. Los bebés prematuros y con bajo peso al nacer pueden enfrentar mayores riesgos de complicaciones de salud.

Las personas con discapacidades, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), la diabetes y los accidentes cerebrovasculares, tienen la durante muchos años la carga de vivir con estas enfermedades y una menor calidad de vida. La EPOC es una enfermedad pulmonar que dificulta la respiración debido al daño pulmonar, y en el 2020 se estima que la exposición a PM_{2,5} provocó 20 (7–41) años vividos con esta discapacidad. Se estima que se pueden atribuir 28 (6–70) años vividos con discapacidad debido a la diabetes, y otros 23 (8–46) años se relacionaron con accidentes cerebrovasculares, lo que equivale a un total de 71 (21–157) años vividos con discapacidad.

Los impactos de la contaminación en la salud de Quintero-Puchuncaví se extienden más allá del padecimiento individual, ya que afecta la productividad laboral y la dinámica familiar. Estas afectaciones a la salud resultaron en un estimado de 37.640 (32.022–43.220) ausencias laborales. Los empleados tomaron licencia por enfermedad no solo por sus propios problemas de salud, sino también para cuidar a familiares enfermos, lo que pone de manifiesto el impacto más amplio de la contaminación en el bienestar de la comunidad.

Estas muertes y enfermedades no mortales han dañado la economía y le costaron a Chile un total estimado de USD 209,4 (158,7–262,3) millones, lo que equivale a CLP 195.000 (148.000–244.800) millones durante el 2013, con los costos económicos que han estado disminuyendo la mayoría de los años, pero que aumentaron en el 2016 y el 2018 en comparación con el año anterior, y cayeron a un estimado de USD 148,7 (113–186,4) millones o CLP 139.000 (105.400–174.000) millones en el 2020. Esta caída de los costos económicos del 2020 probablemente se deba a que el PIB de Chile cayó en torno al 9 % entre el 2019 y el 2020, de aproximadamente USD 278.000 millones durante el 2019 a USD 254.000 millones en el 2020, provocada por la pandemia mundial de COVID-19 (Banco Mundial, 2024). Esta caída del 9 % en el PIB corresponde a una disminución del 9 % en los costos económicos entre estos años.

Tabla 1: Impactos anuales de morbilidad a causa de la exposición a la contaminación del aire del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas durante el 2020

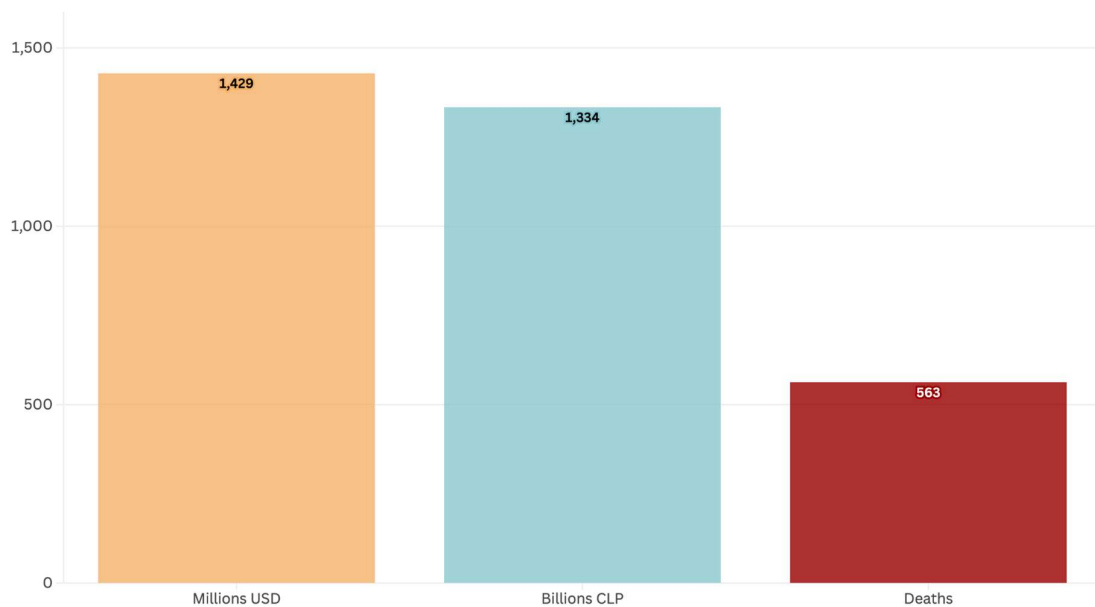
Consecuencias para la salud	Contaminante	Central	Bajo	Alto
Consultas de urgencia por asma	PM _{2,5}	133	80	184
Nacimientos de bajo peso	PM _{2,5}	14	4	25
Nacimientos prematuros	PM _{2,5}	26	13	28
Ausencia laboral (días de licencia por enfermedad)	PM _{2,5}	37.640	32.022	43.220
Años vividos con discapacidad		71	21	157
<i>Debido a</i>				
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	PM _{2,5}	20	7	41
Diabetes	PM _{2,5}	28	6	70
Accidente cerebrovascular	PM _{2,5}	23	8	46

Impacto acumulado de la contaminación en la salud y la economía

Cuando se resumen todas las tasas de mortalidad a lo largo del período de ocho años, el número acumulado de muertes llega a 563 (432-702), que abarca a adultos y niños, incluidos los menores de cinco años, y recalca el costo humano de la exposición a la contaminación del aire.

El impacto económico durante el período de ocho años llega a un estimado de USD 1.400 (1.100–1.800) millones de o CLP 1,3 (1 –1,8) billones, y abarca una variedad de costos tales como el valor estadístico de la vida (muertes), gastos de salud, pérdidas de productividad y otros costos sociales.

Cumulative total economic impacts and deaths between 2013–2020



Source: CREA



Figura 6: Costos económicos totales acumulados (2013-2020) de la contaminación del aire del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas

La Tabla 2 muestra los efectos acumulados que la contaminación del aire del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas ha tenido en los resultados de morbilidad humana entre el 2013 y el 2020. Particularmente, se puede atribuir a la exposición a largo plazo a $PM_{2.5}$

durante el período de ocho años los efectos de salud de gran alcance, tales como un estimado de 1.117 (675–1.555) consultas de urgencia por asma, complicaciones en el parto, entre otros, 129 (40–224) nacimientos con bajo peso y 238 (115–253) nacimientos prematuros. Además, se estima que la exposición a $PM_{2,5}$ contribuyó a 576 (164–1.269) años vividos con discapacidad, con 165 (53–333) provocados por afecciones respiratorias a largo plazo como EPOC, 226 (50–564), por diabetes y 185 (61–373), por accidentes cerebrovasculares. Como resultado del gran impacto en la salud pública, se estima que la contaminación del aire causada por la central eléctrica ha provocado más de 300.000 (260.832–352.044) días de ausencias laborales durante el período de ocho años.

Tabla 2: Efectos acumulados en las consecuencias para la salud y la pérdida de productividad debido a la contaminación del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas del 2013 al 2020

Consecuencias para la salud	Contaminante	Central	Bajo	Alto
Consultas de urgencia por asma	$PM_{2,5}$	1.117	675	1.555
Nacimientos de bajo peso	$PM_{2,5}$	129	40	224
Nacimientos prematuros	$PM_{2,5}$	238	115	253
Ausencia laboral	$PM_{2,5}$	306.593	260.832	352.044
Años vividos con discapacidad		576	164	1.269
<i>Debido a</i>				
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	$PM_{2,5}$	165	53	333
Diabetes	$PM_{2,5}$	226	50	563
Accidente cerebrovascular	$PM_{2,5}$	185	61	373

Conclusiones

Se ha demostrado que las externalidades negativas de la quema de combustibles fósiles, como los procedentes del complejo termoeléctrico de carbón Ventanas, tienen impactos significativos en la población local, el medio ambiente y la economía del país. La vulnerabilidad de Chile a los efectos del cambio climático implica que pronto tendrá que lidiar con las consecuencias de la quema de combustibles fósiles, ya que tendrá una creciente cantidad de sequías, desertificación, incendios forestales, olas de calor mortales, aumento del nivel del mar, erosión costera y eventos climáticos extremos cada vez más intensos que afecten tanto al medio ambiente como a la economía.

Ya se han reconocido los efectos adversos para la salud en la zona costera de Quintero-Puchuncaví y se ha tratado de abordar el problema con medidas reguladoras, como el principio de quien contamina paga (PPP), sin embargo, los desafíos para reforzarlo han puesto de manifiesto los efectos adversos de la producción de energía a base de carbón en la salud pública. En promedio, se podrían haber evitado 64 muertes cada año durante ocho años, si el complejo termoeléctrico no se hubiera expandido después del 2013 y el país hubiera exigido que la empresa operadora redujera la contaminación o cerrara. Esta carga incluye una serie de enfermedades no mortales, como el aumento de las consultas de urgencia relacionadas con el asma, los nacimientos con bajo peso, los nacimientos prematuros y los años vividos con discapacidades debido a afecciones respiratorias y cardiovasculares.

A la luz de estos hallazgos, es esencial fortalecer las regulaciones ambientales y dar prioridad a una transición a energías limpias. La reducción de las emisiones de las centrales termoeléctricas de carbón mediante la aplicación de las mejores tecnologías disponibles (MTD) para la reducción de la contaminación o la transición por completo a fuentes renovables no solo reduciría la carga en el sistema de salud, sino que también generaría beneficios económicos. Si el complejo termoeléctrico Ventanas se hubiera adherido a controles ambientales más estrictos o hubiera cesado sus operaciones antes, se podría haber conseguido un ahorro potencial de USD 162 millones anuales (CLP 152.000 millones) entre el 2013 y el 2020.

Metodología

Emisiones contaminantes

Calculamos las emisiones anuales de SO₂, NO_x y PM_{2,5} (denominado PTS) de las cuatro unidades del complejo termoeléctrico Ventanas. Supusimos que cada unidad cumplía con las normas nacionales para concentraciones de gases de combustión contaminantes, que son 500 mg/Nm³ para NO_x, 400 mg/Nm³, para SO₂ y 50 mg/Nm³, para partículas totales en suspensión (PTS) (Ministerio de Energía, 2018). Los niveles de concentración de gases de combustión se convirtieron en emisiones, que variaron en cada unidad dependiendo de las distintas características, entre otros, los factores de capacidad, la generación y el consumo de carbón. De conformidad con la US EPA (1998), suponemos que el 30 % de las PTS se emiten en forma de PM_{2,5} y el 37,5 %, en forma de PM₁₀. Las características de la pila y las emisiones contaminantes por hora aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3: Características de la pila y datos de emisiones

Unidad	SO ₂ , kg/h	NO _x , kg/h	PTS, kg/h	Altura, m	Diámetro, m
Ventanas 1 (Unidad 1)	75,12	136,0	22,74	61,0	5,50
Ventanas 2 (Unidad 2)	125,9	180,32	16,97	62,0	4,20
Nueva Ventanas (Unidad 3)	232,34	224,36	12,42	95,0	4,70
Campiche (Unidad 4)	185,77	212,58	6,81	95,0	4,70

Modelación atmosférica (CALPUFF)

Simulamos las concentraciones de contaminantes del aire utilizando el modelo de dispersión de aire CALPUFF, versión 7 (Scire et al., 2000; Exponent, 2015). CALPUFF ha sido un modelo estándar de la industria utilizado ampliamente para evaluar impactos de largo alcance en la calidad del aire de fuentes fijas de contaminación. Es utilizado tanto por los entes reguladores, como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) (US EPA, 2023), como en la investigación académica (Zhang et al., 2020). Gracias a su capacidad para capturar los procesos químicos complejos y el transporte atmosférico de contaminantes a la

atmósfera, la US EPA aprueba oficialmente el uso del modelo CALPUFF para investigar los casos en los que se espera que una fuente de emisión genere el transporte de la contaminación a larga distancia (US EPA, 2023). El modelo ha sido evaluado ampliamente por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos; es de código abierto y está totalmente documentado. El modelo CALPUFF se ha aplicado en muchas regiones del mundo, entre ellas Estados Unidos (Rzeszutek, 2019), Europa (Holnicki et al., 2016), Centroamérica (Hernández-Garcés et al., 2020), Sudamérica (Arregocés y Rojano., 2023), Medio Oriente (Ghannam y El-Fadel, 2013), Asia (Zhou et al., 2003; Jittra et al., 2015) y África (Affum et al., 2016).

CALPUFF calcula el transporte atmosférico, la dispersión, la transformación química y la depositación de los contaminantes, además de las concentraciones incrementales resultantes a nivel del suelo atribuidas a las fuentes de emisiones estudiadas. Las transformaciones químicas de SO₂ y NO₂ a PM_{2,5} se calculan utilizando ISORROPIA. Las concentraciones de fondo de oxidantes (ozono, amoníaco, peróxido de hidrógeno) se toman de un modelo químico atmosférico global. Los datos de entrada meteorológica para el año 2019 se generan a partir del modelo de Weather Research & Forecasting (Pronóstico e investigación meteorológica) (WRF) (Skamarock et al., 2008), versión 4.2.2. El WRF se estableció con 33 niveles verticales y dos cuadrículas anidadas. El nido madre tiene una resolución de cuadrícula de 15 km y se extiende 2.700 km en dirección norte-sur y 1.500 km en dirección este-oeste. El nido interior tiene una resolución de cuadrícula de 3 km, se extiende por 300 km en las direcciones norte-sur y este-oeste, y se centra sobre el complejo termoeléctrico Ventanas.

Los dominios madre e interior utilizan una técnica de anidación bidireccional que garantiza la interacción dinámica entre ellos. Las simulaciones de WRF utilizan condiciones de límites iniciales y laterales del conjunto de datos de Reanálisis del Sistema de Predicción del Clima (CFRS) de los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), que producen datos meteorológicos tridimensionales cada hora que abarcan todo el año calendario 2019.

Para la evaluación de las concentraciones anuales promedio de contaminantes, se supone que las emisiones son constantes a lo largo del año. Las emisiones de cada una de las unidades se modelaron como fuentes fijas separadas. Las centrales eléctricas se modelaron como fuentes fijas flotantes, teniendo en cuenta la altura de la pila y el aumento de la pluma térmica de las pilas.

Evaluación de impacto en la economía y la salud

A partir de las distribuciones espaciales de los contaminantes simuladas por el modelo de dispersión de aire CALPUFF, se calcularon los impactos públicos y económicos correspondientes para los años 2013 - 2020. CREA ha elaborado un marco detallado de evaluación de impacto en la salud (HIA por sus siglas en inglés) que se puede implementar a nivel mundial basado en la ciencia más reciente (Myllyvirta, 2020). Este marco incluye un

conjunto lo más completo posible de las consecuencias para la salud sin solapamientos evidentes. En este trabajo, supusimos que las contribuciones de contaminación de las instalaciones y los niveles generales de contaminación fueron constantes durante el período 2013-2020. Se incluyeron en el cálculo los cambios de población y del PIB durante estos años.

Se hace hincapié en los resultados para los que se dispone de datos de incidencia a nivel nacional a partir de conjuntos de datos mundiales y en los resultados que tienen gran relevancia para los costos de atención médica y la productividad laboral. Estos criterios de valoración sobre la salud fueron seleccionados y cuantificados de manera que posibilitara la valoración económica, ajustada por los niveles de producción económica y los ingresos en distintas jurisdicciones.

Para cada consecuencia para la salud evaluada, hemos seleccionado una relación concentración-respuesta que se ha utilizado para cuantificar la carga sanitaria de la contaminación del aire a nivel mundial en la literatura revisada por pares. Esto indica que la evidencia es lo suficientemente madura como para que sea aplicada en geografías y niveles de exposición distintos. El cálculo de los impactos en la salud sigue un cálculo epidemiológico estándar:

$$\Delta \text{casos} = \text{Pob} \times \sum_{\text{Edad}} \left[\text{Frag}_{\text{Edad}} \times \text{Incidencia}_{\text{Edad}} \times \frac{\text{RR}_{c,\text{Edad}} - 1}{\text{RR}_{c,\text{Edad}}} \right],$$

Donde:

Pob es la población total en la ubicación de la cuadrícula;

Edad es el grupo etario analizado. En el caso de las funciones de concentración-respuesta dependientes de la edad, un segmento de edad de 5 años; en los demás casos, el rango de edad total al que es aplicable la función;

Frag edad es el fragmento de la población perteneciente al grupo etario analizado;

Incidencia_{Edad} es la incidencia de referencia del criterio de valoración sobre la salud analizado;

c es la concentración de contaminantes; y,

RR_{c, edad} es la función que da la relación de riesgo de consecuencias para la salud analizado en la concentración dada para el grupo etario dado en comparación con el aire limpio. En el caso de una función de concentración-respuesta logarítmica y lineal, no específica para la edad, la función RR se convierte en:

$$RR(c) = RR_0 c - c_0 \Delta c_0 \text{ cuando } c > c_0,$$

$$RR(c) = 1, \text{ cuando } c \leq c_0$$

Donde:

RR_0 es la relación de riesgo encontrada en la investigación epidemiológica;

Δc_0 es el cambio de concentración al que se refiere RR_0 ; y

c_0 es la concentración que se supone que no hace daño, en general, la concentración más baja encontrada en los datos del estudio.

Los datos sobre la población total y la estructura de edad de la población se tomaron de los resultados del proyecto Global Burden of Disease (Carga global de enfermedades) para el año 2019 (Murray et al., 2020), a los que accedió el Instituto para la Métrica y Evaluación de la Salud (IHME, 2020). La distribución espacial de la población dentro de cada ciudad y país, proyectada para el 2020, se basó en la población mapeada del mundo versión 4 del Centro para la Red Internacional de Información sobre Ciencias de la Tierra (CIESIN, 2018).

Las muertes de adultos se estimaron utilizando las funciones de riesgo desarrolladas por Burnett et al. (2018), aplicadas por Lelieveld et al. (2019). Las muertes de niños menores de cinco años por infecciones de las vías respiratorias bajas vinculadas con la contaminación por $PM_{2.5}$ se evaluaron utilizando la función del riesgo de carga global de enfermedades para enfermedades de las vías respiratorias bajas (IHME, 2020). Para todos los resultados de mortalidad, los datos específicos de la causa se tomaron de los resultados del proyecto Global Burden of Disease correspondientes al 2019 (IHME, 2020).

El modelado del impacto en la salud proyecta los efectos de la exposición a contaminantes durante el año de estudio. Algunos efectos en la salud son inmediatos, como la exacerbación de los síntomas del asma y la pérdida de días de trabajo, mientras que otros efectos crónicos pueden tener una latencia de varios años. Las relaciones concentración-respuesta para las consultas de urgencia por asma y las ausencias laborales se basaron en estudios que evaluaron las variaciones diarias en las concentraciones de contaminantes y las consecuencias para la salud; estas relaciones se aplicaron a los cambios en las concentraciones promedio anuales. En la Tabla 4 se presenta un resumen general de los datos de entrada para estimar los impactos de la contaminación del aire en la salud pública.

Tabla 4: Parámetros de entrada y datos utilizados para estimar los impactos en la salud física

Grupo etario	Efecto	Contaminante	Función concentración-respuesta	Cambio de concentración	Umbral sin riesgo	Referencia	Datos de incidencia
1-18	Nuevos casos de asma	NO ₂	1,26 (1,10-1,37)	10 ppb	2 ppb	Khreis et al. (2017)	Achakulwisut et al. (2019)
0-17	Consultas de urgencia por asma	PM _{2,5}	1,025 (1,013-1,037)	10 µg/m ³	6 µg/m ³	Zheng et al. (2015)	Anenberg et al. (2018)
18-99	Consultas de urgencia por asma	PM _{2,5}	1,023 (1,015-1,031)	10 µg/m ³	6 µg/m ³	Zheng et al. (2015)	Anenberg et al. (2018)
Recién nacido	Nacimiento prematuro	PM _{2,5}	1,15 (1,07-1,16)	10 µg/m ³	8,8 µg/m ³	Sapkota et al. (2012)	Chawanpaiboon et al. (2018)
20-65	Ausencia laboral	PM _{2,5}	1,046 (1,039-1,053)	10 µg/m ³	N/C	OMS (2013)	EEA (2014)
0-4	Muertes por infecciones de las vías respiratorias bajas	PM _{2,5}	IHME (2020)		5,8 µg/m ³	IHME (2020)	IHME (2020)
25-99	Muertes por enfermedades no transmisibles, desglosadas por causa, y por infecciones de las vías respiratorias bajas	PM _{2,5}	Burnett et al. (2018)		2,4 µg/m ³	Burnett et al. (2018)	IHME (2020)
25-99	Discapacidad causada por diabetes, accidente cerebrovascular y enfermedad respiratoria crónica	PM _{2,5}	IHME (2020)		2,4 µg/m ³	Burnett et al. (2018)	IHME (2020)
25-99	Muertes prematuras	NO ₂	1,02 (1,01-1,04)	10 µg/m ³	4,5 µg/m ³	Huangfu & Atkinson. (2020); NRT de Stieb et al. (2021)	IHME (2020)
25-99	Muertes prematuras	SO ₂	1,02 (1,01-1,03)	5 ppb	0,02 ppb	Krewski et al. (2009)	IHME 2020

Nota: Los valores numéricos de la columna "Función concentración-respuesta" se refieren a la relación de probabilidades (OR por sus siglas en inglés) correspondiente al aumento de las concentraciones indicado en la columna "Cambio de concentración". Las referencias de la literatura indican el uso de una función de concentración-respuesta no lineal. El umbral sin daños se refiere a una concentración por debajo de la cual no se cuantifican los efectos en la salud, generalmente porque los estudios en los que se basa la función no incluyeron a personas con niveles de exposición más bajos. No existen datos sobre las relaciones concentración-respuesta para todos los lugares geográficos, por lo que se aplica un modelo de riesgo global a todas las ciudades. Por lo general, no se dispone de datos de incidencia a nivel de ciudad, por lo que se deben aplicar promedios nacionales.

La contaminación del aire aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y aumenta las complicaciones derivadas de ellas, lo que reduce significativamente la calidad de vida y la productividad económica de las personas afectadas y aumenta los costos de salud. Las pérdidas económicas provocadas por la contaminación del aire se calcularon utilizando los métodos descritos en Myllyvirta et al. (2020). La valoración de las muertes se actualizó según los valores derivados de Viscusi y Masterman (2017), que se basan en datos del mercado laboral, y prestan especial atención a la aplicabilidad en países de ingresos medios y bajos. El proyecto Global Burden of Disease ha cuantificado el grado de discapacidad causado por cada enfermedad en una "ponderación de discapacidad" que se puede utilizar para comparar los costos de diferentes enfermedades. El costo económico de la discapacidad y la reducción de la calidad de vida causada por estas enfermedades y discapacidades se evalúan a partir de las ponderaciones de la discapacidad, combinadas con la valoración económica de la discapacidad utilizada por el regulador ambiental del Reino Unido DEFRA (Birchby et al., 2019), y ajustadas por el GNI PPP para Chile. Las muertes de niños pequeños se valoran al doble de las muertes de adultos, según las recomendaciones de la OCDE (2012). Aunque utilizamos un estudio de 2018 de Burnett et al. (2018) para la función dosis-respuesta para las muertes por enfermedades no transmisibles provocadas por la exposición a $PM_{2.5}$, hay un estudio más reciente del 2023 de Henneman et al. (2023) que concluye que el coeficiente dosis-respuesta para la mortalidad asociado con la exposición a $PM_{2.5}$ de las centrales termoeléctricas de carbón es 2,1 veces mayor que el de otras fuentes, lo que indica que este estudio podría estar subestimando las tasas de mortalidad por $PM_{2.5}$.

Referencias

Affum, H. A., Akaho, E. H. K., Niemela, J. J., Armenio, V. & Danso, K. A. (2016). Validating the California Puff (CALPUFF) Modelling System Using an Industrial Area in Accra, Ghana as a Case Study. *Open Journal of Air Pollution*, Volume 5: 27-36. Published Online March 2016 in SciRes. https://www.scirp.org/pdf/OJAP_2016033109554592.pdf

Anenberg, S., Henze, D., Tinney, V., Kinney, P., Raich, W., et al. (2018). Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. *Environmental Health Perspectives*, 126(10).<https://doi.org/10.1289/EHP3766>

Arregocés, H. A., & Rojano, R. (2023). Sensitivity of the CALMET-CALPUFF model system on estimating PM₁₀ concentrations at a mining site in northern Colombia. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266601642300107X>

Birchby, D., Stedman, J., Whiting, S. & Vedrenne, M. (2019). Air Quality Damage Cost Update 2019. 2019. Ricardo/ED59323/Issue Number 2.0. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/1902271109_Damage_cost_update_2018_FINAL_Isue_2_publication.pdf

Boyd, D. R. (2023). United Nations Special Rapporteur on human rights and the environment. Statement at the conclusion of country visit to Chile. United Nations General Assembly, Human Rights Council. A/HRC/55/43/Add.1. <https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/issues/environment/srenvironment/eom-statement-Chile-12-May-2023-EN.pdf>

Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., et al. (2018). Global Estimates of Mortality Associated with Long-Term Exposure to Outdoor Fine Particulate Matter. *Proceeding of the National Academies of Science*, 115 (38): 9592-9597). <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>

CIESIN. (2018). Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2018. <https://doi.org/10.7927/H4F47M65>

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., et al. (2017). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa1702747>

Exponent. (2015). CALPUFF Modeling System. <http://www.src.com>

Ghannam, K. & El-Fadel, M. (2013). A framework for emissions source apportionment in industrial areas: MM5/CALPUFF in a near-field application. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Volume 63 (2):190–204. <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10962247.2012.739982?needAccess=true>

Global energy monitor (GEM). (2024). Ventanas power station.

https://www.gem.wiki/Ventanas_power_station

Health Effects Institute (HEI). 2024. State of Global Air 2024. Available: www.stateofglobalair.org [accessed October 29, 2024]. Data source: Global Burden of Disease Study 2021. IHME, 2024.

<https://www.stateofglobalair.org/data/#/health/plot?country=AFG&pollutant=pm25&measure=death&deathMetric=number&geography=country®ion=country&subregions=Chile&outcome=burden®ionToggle=0&globals=false&hideCountry=false>

Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). (2020). GBD Results.

<http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>

Henneman, L., Choirat, C., Dedoussi, I., Dominici, F., Roberts, J., & Zigler, C. (2023). Mortality risk from United States coal electricity generation. *Science*, 382 (6673): 941-946. [doi: 10.1126/science.adf4915](https://doi.org/10.1126/science.adf4915)

[10.1126/science.adf4915](https://doi.org/10.1126/science.adf4915)

Hernández-Garcés, A., Cécé, R., Ferrer-Hernández, A., Bernard, D., Jáuregui-Haza, U., Zahibo, N. & González, J. (2020). Intercomparison of FLEXPART and CALPUFF dispersion models. An application over a small tropical island. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/52818>

Holnicki, P., Kałuszko, A., & Trapp, W. (2016). An urban scale application and validation of the CALPUFF model. *Atmospheric Pollution Research*, 7(3), 393-402.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.016>

Jittra, N., Pinthong, N., & Thepanondh, S. (2015). Performance Evaluation of AERMOD and CALPUFF Air Dispersion Models in Industrial Complex Area.

<https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.4137/ASWR.S32781>

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of Fossil Fuel and Total Anthropogenic Emission Removal on Public Health and Climate. *Proceedings of the National Academies of Science*, 116 (15):7192-7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>

Lerner, S. (2012). *Sacrifice zones: the front lines of toxic chemical exposure in the United States*. MIT Press. <https://direct.mit.edu/books/book/3300/sacrifice-zonesthe-front-lines-of-toxic-chemical>

Ley Chile. (1994). *APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE*. Ley 19300. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

McDuffie, E., Martin, R., Spadaro, J., Burnett, R., Smith, S., et al. (2021). Source Sector and Fuel Contributions to Ambient PM_{2,5} and Attributable Mortality Across Multiple Spatial Scales. *Nature Communications*, 12 (3594). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23853-y>

Ministerio de Energía. (2018). *Estudio de variables ambientales y sociales que deben abordarse para el cierre o reconversión programada y gradual de generación eléctrica a carbón*. Consultora INODU. 192p.

Ministerio del Medio Ambiente. (2011). Decreto 13, Establece Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (Actualizado el 2015)
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1026808>

Murray, C. J. L., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., et al. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223–1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)

Myllyvirta, L. (2020). Quantifying the Economic Costs of Air Pollution from Fossil Fuels. Centre for Research on Energy and Clean Air. 2020. <https://energyandcleanair.org/publications/costs-of-air-pollution-from-fossil-fuels/>

Myllyvirta, L., Farrow, A., Fuentes, C., & Fernández, A. (2020). IMPACTOS DE LAS EMISIONES DE LAS TERMOELÉCTRICAS A CARBON EN LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS COMUNAS DE HUASCO Y PUCHUNCAVÍ. Recuperado de https://www.greenpeace.to/greenpeace/wpcontent/uploads/2020/02/Informe-Emisiones_Rev_KAS_CHS_VF.pdf.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2008). *The Polluter Pays Principle: Definition, Analysis, Implementation*. OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/9789264044845-en>.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2012). *Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies*. <https://doi.org/10.1787/9789264130807-en>

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). *OECD Environmental Performance Reviews: Chile 2016*, OECD Environmental Performance Reviews, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264252615-en>.

Rzeszutek, M. (2019). Parameterization and evaluation of the CALMET/CALPUFF model system in near-field and complex terrain - Terrain data, grid resolution and terrain adjustment method. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719329523>

Scire, J., Strimaitis, D. & Yamartino, R. (2000). A User's Guide for the CALPUFF dispersion model. https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc507/ADM/calpuff/CALPUFF_UsersGuide-v5-excellent.pdf

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. University Corporation for Atmospheric Research.
<https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>

Snifa — Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental. (2014) SMA. Termoeléctricas. Datos reportados con respecto al D.S. N° 13/2011. <https://snifa.sma.gob.cl/DatosAbiertos>

Triozzi, N. (2023). Decarbonizing Chile. From Fossil Fuels to Renewables: Is this Chile's Energy Revolution? ArcGIS StoryMaps. Retrieved October 29, 2024.
<https://storymaps.arcgis.com/stories/c90e1d46d4ef4e13aa88a0d85b269a4b>

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2023). Air Quality Dispersion Modeling — Alternative Models. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models#calpuff>

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1998). AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>

Viscusi, W. K., & Masterman, C. J. (2017). Income Elasticities and Global Values of a Statistical Life. *Journal of Benefit-Cost Analysis* 8(2): 226-250. <https://doi.org/10.1017/bca.2017.12>

World Bank, 2024. GDP (current US\$) - Chile. World Bank national accounts data. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=CL>

World Health Organization (WHO) (2021). WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2,5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

Zhou, Y., Levy, J. I., Hammitt, J. K., & Evans, J. S. (2003). Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: A case study in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 37(6), 815-826. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00937-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00937-8)

Certificación de la traductora:

Yo, Carla Andrea Mendoza González, cédula de identidad 13.889.990-K, Traductora de Alemán e Inglés al Español de la Pontificia Universidad Católica de Chile y socia N.º 117 del Colegio de Traductores e Intérpretes de Chile, COTICH, declaro que se trata de una traducción verdadera y fiel de un documento en inglés que he recibido por correo electrónico y que he traducido al español en la medida de mis posibilidades. Fecha: 02 de diciembre de 2024



 **COTICH**
COLEGIO DE TRADUCTORES
E INTERPRETES DE CHILE

Credencial de socio



 **CARLA ANDREA MENDOZA GONZÁLEZ**
RUN: 13.889.990-K | Núm. socio: 117

TRADUCTORA
alemán>español, inglés<>español

Credencial válida hasta 2025 solo si el perfil se encuentra activado en www.cotich.cl