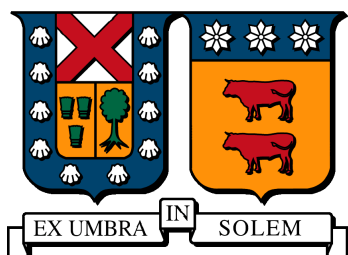


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**EVALUACIÓN DE EMISIONES DE
CENTRALES A CARBÓN EN CHILE EN EL
PERÍODO 2015-2040 CON ENFOQUE EN
SALUD Y NORMATIVA AMBIENTAL**

VALENTINA PAZ FRANCKE PIZARRO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

PROFESOR GUÍA : MAURICIO OSSES
PROFESOR CORREFERENTE : BENJAMÍN CARVAJAL

ABRIL 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: **EVALUACIÓN DE EMISIONES DE CENTRALES A CARBÓN EN CHILE EN EL PERÍODO 2015-2040 CON ENFOQUE EN SALUD Y NORMATIVA AMBIENTAL**

Nombre del candidato(a): **VALENTINA PAZ FRANCKE PIZARRO**

Carrera / Grado: **INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA**

Campus: **SAN JOAQUÍN** Departamento: **MECÁNICA**

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, MAURICIO OSSES ALVARADO, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: **05/05/2026** Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: **05 / 05 / 2026** Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada quisiera agradecer a la organización Uno Punto Cinco, ya que esta memoria se considera como un fruto del trabajo realizado en 2025 con la campaña Retiro al Carbón. Durante este tiempo tuve la oportunidad de aprender mucho sobre este tema y de acercarme con mayor profundidad a la discusión sobre la transición energética en el país.

Durante todos los procesos que he tenido en mi carrera universitaria, y todas las diversas noticias que han sacudido al país desde 2019, siempre recuerdo haber estado con gente a mi lado. Con personas de las que aprendí mucho, con las que conversé, reí, viví, de las que me acuerdo siempre y agradezco haber podido conocer. A algunas de ellas menciono especialmente en estas líneas.

A mi profesor, Mauricio Osses, y a Benjamín Carvajal, tremendos profesionales que no dejaron de lado ser también personas con enorme calidad humana. De las que tuve la suerte de conocer el cómo piensan y su sobresaliente forma de ser.

A mi pareja, Marcos Pereira, con quién he aprendido y me ha apoyado en todas. Espero siempre hacerte sentir como me siento yo contigo; casi que me voy al fin del mundo a buscarte, la suerte que te vi.

A mi familia, con quien siempre he tenido la confianza de que creen en mi y confían en mis decisiones. Mis abuelos, que me han criado y de los que tengo mi manera de ser y comportarme en la vida. Mis tíos, que siempre tienen un consejo que darme y trato de escucharlos todos. Mi mamá, a quien quiero con mi vida, y mi papá, del que no tengo palabras para decir lo mucho que significas para mí, más que el mejor papá del mundo.

Los admiro sinceramente, cada uno por cosas distintas. Cuando converso con ustedes siempre me llena de felicidad los pequeños cambios con los que me encuentro. En mi futuro, o en la persona que me convierto día a día, siempre los tengo como ejemplos y banderas.

RESUMEN

El objetivo de esta memoria es analizar las emisiones del parque termoeléctrico a carbón en Chile durante el período 2015-2040, considerando su vínculo con la regulación ambiental y los estándares sanitarios. A partir de datos de consumo de carbón reportados, y basándose en metodologías internacionales como la AP42 y el IPCC 2006-2019, se estiman emisiones históricas de dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, material particulado respirable y fino, y metano. Los resultados obtenidos muestran, en términos generales, una consistencia razonable con los valores reportados por el Ministerio del Medio Ambiente, identificando oportunidades de mejora a los datos estatales asociadas a metodología, calidad de combustible y datos de eficiencia disponibles.

Sobre esta base se proyectan las emisiones del parque a carbón hasta 2040 bajo distintos escenarios de descarbonización: medidas formalmente aprobadas, compromisos empresariales al 2040, cierre al 2035 y cese operativo al 2030. El análisis comparativo evidencia que, mientras los esquemas de cierre progresivo mantienen emisiones residuales incluso después de 2040, el escenario de retiro al 2030 logra la mitigación total de los contaminantes analizados al inicio de dicho periodo.

Finalmente, se evalúa el cumplimiento de las emisiones proyectadas y monitoreadas respecto de la normativa chilena de calidad del aire y los planes de prevención y descontaminación atmosférica en las principales zonas con presencia termoeléctrica a carbón: Tocopilla, Mejillones, Huasco, Quintero-Puchuncaví y Coronel. El estudio revela que factores como la ventilación atmosférica pueden enmascarar niveles críticos de emisión y confirma la persistencia de estados de latencia, particularmente en material particulado fino, lo que evidencia la necesidad de fortalecer los instrumentos regulatorios. Estos hallazgos aportan evidencia técnica relevante para la toma de decisiones en materia de descarbonización, regulación ambiental y protección de la salud, reforzando la importancia de acelerar la salida del carbón del sistema eléctrico chileno para reducir de manera efectiva los impactos ambientales y sanitarios en las comunidades afectadas.

ABSTRACT

This report seeks to analyze the emissions of the coal-fired thermoelectric power plant fleet in Chile over the period 2015–2040, considering their relationship with environmental regulation and health standards. Based on reported coal consumption data, and using international methodologies such as AP42 and the IPCC 2006-2019 guidelines, historical emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide, coarse and fine particulate matter, and methane are estimated. Overall, the results show a reasonable consistency with the values reported by the Ministry of the Environment, while identifying opportunities to improve official datasets related to methodological aspects, fuel quality assumptions, and the availability of efficiency data.

Then, emissions from the coal-fired power fleet are projected through 2040 under different decarbonization scenarios: formally approved measures, corporate commitments to 2040, closure by 2035, and complete phase-out by 2030. The comparative analysis shows that, while progressive closure pathways maintain residual emissions even beyond 2040, the phase-out scenario by 2030 achieves the complete mitigation of all analyzed pollutants at the beginning of that decade.

Finally, compliance of both projected and monitored emissions is assessed against Chilean air quality regulations and prevention and decontamination plans in the main coal-fired power generation zones: Tocopilla, Mejillones, Huasco, Quintero-Puchuncaví, and Coronel. The study reveals that atmospheric ventilation conditions may mask critical emission levels and confirms the persistence of latent air quality states, particularly for fine particulate matter, highlighting the need to strengthen regulatory instruments. These findings provide relevant technical evidence to support decision-making in decarbonization policies, environmental regulation, and public health protection, reinforcing the importance of accelerating the phase-out of coal from the Chilean power system to effectively reduce environmental and health impacts on affected communities.

Contenidos

Introducción	14
1 Estado del arte	16
1.1 Caracterización de las centrales a carbón en Chile	16
1.1.1 Clasificación y evolución de la capacidad instalada a carbón	18
1.1.2 Generación de energía por central	20
1.1.3 Participación en matriz energética	20
1.2 Emisiones atmosféricas y tecnologías de abatimiento	22
1.2.1 Emisiones	23
1.2.2 Sistemas de abatimiento	24
1.3 Estimación de emisiones	26
1.3.1 Metodologías internacionales	26
1.3.2 Metodologías nacionales	27
1.4 Conclusiones del estado del arte	28
2 Cálculo de emisiones históricas	29
2.1 Metodología de cálculo	29
2.1.1 Consumo de combustible	30
2.1.2 Factores de emisión	32
2.1.3 Calidad del carbón	33
2.1.4 Eficiencias de abatimiento	34
2.2 Resultados	36
2.2.1 Dióxido de carbono	36
2.2.2 Monóxido de carbono	37
2.2.3 Óxidos de nitrógeno	40
2.2.4 Dióxidos de azufre	41
2.2.5 Material particulado respirable	42
2.2.6 Material particulado fino	43
2.2.7 Metano	44
2.2.8 Resumen de la estimación realizada	45
3 Proyección de emisiones	46
3.1 Metodología de proyección	46
3.1.1 Generación y definición de escenarios	46
3.1.2 Estimación de operación	48

3.1.3	Estimación de emisiones en caso Guacolda: co-firing	49
3.1.4	Escenarios proyectados	51
3.1.5	Business as usual	51
3.1.6	Compromisos al 2040	52
3.1.7	Cierre al 2035	52
3.1.8	Operación sin carbón al 2030	53
3.2	Proyección de emisiones	53
3.2.1	Emisiones proyectadas de dióxido de carbono	54
3.2.2	Emisiones proyectadas de dióxido de azufre	55
3.2.3	Emisiones proyectadas de óxidos de nitrógeno	56
3.2.4	Emisiones proyectadas de material particulado respirable	57
3.2.5	Emisiones proyectadas de material particulado fino	58
3.2.6	Resumen de proyección de emisiones	58
4	Cumplimiento según normativa ambiental y recomendaciones internacionales	59
4.1	Normativa ambiental	61
4.1.1	Plan de descontaminación Tocopilla	61
4.1.2	Situación normativa de Mejillones	63
4.1.3	Plan de prevención Huasco	63
4.1.4	Plan de descontaminación Concón, Quintero y Puchuncaví	65
4.1.5	Plan de descontaminación Zona Coronel	68
4.2	Estado de calidad de aire de las comunas de interés según normativa nacional	69
4.2.1	Tocopilla	70
4.2.2	Mejillones	70
4.2.3	Huasco	71
4.2.4	Concón-Quintero-Puchuncaví	71
4.2.5	Coronel	72
4.3	Comparación de concentraciones registradas con normativa nacional y recomendaciones internacionales	73
4.3.1	Óxidos de nitrógeno	74
4.3.2	Dióxido de azufre	75
4.3.3	Material particulado respirable	78
4.3.4	Material particulado fino	80
4.4	Análisis de datos de salud disponibles	81
4.4.1	Selección de macrozonas y centros de salud	81
4.4.2	Resultados exploratorios	83
4.5	Conclusiones de normativa nacional y recomendaciones internacionales	86

Conclusiones	88
A Factores de emisión	99
B Sistemas de abatimiento y sus eficiencias	101
C Detalle de estimación de emisiones	107
D Análisis de centros de salud complementario	115

Índice de figuras

1.1	Gráfico de evolución anual de capacidad instalada en MW. Elaboración propia en base a datos entregados por las empresas.	18
1.2	Evolución anual de generación eléctrica en GWh por central. Elaboración propia en base a datos de la CNE [Comisión Nacional de Energía, 2025b].	20
1.3	Evolución anual de capacidad instalada bruta por tecnología en MW. Elaboración propia en base a datos del Coordinador Eléctrico Nacional [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025a].	21
1.4	Evolución anual de generación eléctrica por tecnología en GWh. Elaboración propia en base a datos del Coordinador Eléctrico Nacional [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025b].	22
2.1	Evolución anual de consumo de carbón en kilotoneladas por entidad declarada. Elaboración propia en base a datos de la CNE [Comisión Nacional de Energía, 2025a].	31
2.2	Evolución anual de consumo de carbón en kilotoneladas clasificación según fecha de cierre. Elaboración propia en base a datos de la CNE [Comisión Nacional de Energía, 2025a].	32
2.3	Comparación de emisiones de dióxido de carbono obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.	36
2.4	Comparación de emisiones de monóxido de carbono obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.	37
2.5	Emisión específica de monóxido de carbono por entidad. Elaboración propia.	38
2.6	Comparación de emisiones de monóxido de carbono obtenidas con datos RETC si el factor de emisión de la central Andina fuera como el resto de unidades. Elaboración propia.	39
2.7	Comparación de emisiones de óxidos de nitrógeno obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.	40
2.8	Comparación de emisiones de dióxido de azufre obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.	41
2.9	Comparación de emisiones de MP ₁₀ obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.	42
2.10	Comparación de emisiones de MP _{2,5} obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.	43
2.11	Emisión de metano anual por entidad. Elaboración propia.	44
3.1	Comparación del consumo mensual de carbón del parque termoeléctrico a carbón en Chile entre 2024 y 2025. Elaboración propia.	48
3.2	Comparación del consumo mensual de carbón del parque termoeléctrico a carbón en Chile en diferentes años. Elaboración propia.	49
3.3	Comparación de emisiones de óxidos de nitrógeno en diferentes relaciones másicas de amoníaco. Reelaboración de figura presentada por [Ahmad et al., 2023].	50
3.4	Proyección consumo de carbón. Elaboración propia.	51

4.1	Consumo de carbón en 2024 específico por comuna y central generadora. Elaboración propia.	60
4.2	Comparación entre emisiones históricas estimadas de material particulado respirable en Tocopilla y los límites establecidos en el PDA. Elaboración propia.	62
4.3	Comparación de emisiones históricas calculadas de material particulado en Huasco versus límites establecidos en el plan de prevención de Huasco.	64
4.4	Comparación de emisiones históricas calculadas de material particulado en Concón - Quintero - Puchuncaví versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.	66
4.5	Comparación de emisiones históricas calculadas de dióxido de azufre en Concón - Quintero - Puchuncaví versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.	67
4.6	Comparación de emisiones históricas calculadas de óxidos de nitrógeno en Concón - Quintero - Puchuncaví versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.	68
4.7	Comparación de emisiones históricas calculadas de material particulado en Coronel versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.	69
4.8	Comparación de valores en promedio de 1 hora correspondientes al año 2023 en norma horaria de NO ₂ nacional y recomendaciones internacionales.	74
4.9	Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de NO ₂ nacional y recomendaciones internacionales.	75
4.10	Comparación de valores en promedio de 1 hora correspondientes al año 2023 en norma horaria de SO ₂ nacional y recomendaciones internacionales.	76
4.11	Comparación de valores en promedio de 24 horas correspondientes al año 2023 en norma horaria de SO ₂ nacional y recomendaciones internacionales.	77
4.12	Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de SO ₂ nacional y recomendaciones internacionales.	78
4.13	Comparación de valores en promedio de 24 horas correspondientes al año 2023 en norma horaria de MP ₁₀ nacional y recomendaciones internacionales.	79
4.14	Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de MP ₁₀ nacional y recomendaciones internacionales.	79
4.15	Comparación de valores en promedio de 24 horas correspondientes al año 2023 en norma horaria de MP _{2,5} nacional y recomendaciones internacionales.	80
4.16	Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de MP _{2,5} nacional y recomendaciones internacionales.	81
4.17	Comparación de atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en Tocopilla, en Hospital de Tocopilla.	84
4.18	Comparación de atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en Tocopilla, en Hospital de Mejillones.	85

4.19	Comparación de atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en Coronel, en Hospital de Coronel.	86
C.1	Detalle de resultados del calculo de emisiones de CO ₂ en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	108
C.2	Detalle de resultados del calculo de emisiones de CO en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	109
C.3	Detalle de resultados del calculo de emisiones de NO _x en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	110
C.4	Detalle de resultados del calculo de emisiones de SO ₂ en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	111
C.5	Detalle de resultados del calculo de emisiones de MP ₁₀ en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	112
C.6	Detalle de resultados del calculo de emisiones de MP _{2,5} en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	113
C.7	Detalle de resultados del calculo de emisiones de CH ₄ en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.	114
D.1	Comparación de a atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en la macrozona 03, aislando Antofagasta, ID 03-102, 03-104, 03-943, 03-944, 03-945.	115
D.2	Comparación de a atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en recintos a 10 km de las carboneras, ID 18-105, 18-106, 18-812, 18-813, 18-977. .	116

Índice de tablas

1.1	Unidades desconectadas. Elaboración propia en base a datos de cada empresa.	17
1.2	Clasificación de unidades a carbón existentes a 2025. Elaboración propia en base a datos de cada empresa.	19
1.3	Breve descripción de las emisiones propias de las termoeléctricas a carbón. Elaboración propia.	23
2.1	Detalle de contaminantes contemplados, junto con las fuentes metodológicas respectivas utilizadas para el cálculo. Elaboración propia.	30
2.2	Características promedio del carbón importado a Chile entre 2015 y 2017.	33
2.3	Características de carbón utilizadas por RETC. Extracto de guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales, 2019.	33
2.4	Sistemas de abatimiento por entidad.	34
3.1	Multiplicadores de emisiones de NO _x considerando sustitución másica versus una combustión con 0% amoníaco. Elaboración propia en base a datos presentados por [Ahmad et al., 2023].	50
3.2	Consideraciones BAU. Elaboración propia.	52
3.3	Consideraciones escenario compromisos al 2040. Elaboración propia.	52
3.4	Consideraciones escenario cierre al 2035. Elaboración propia.	53
3.5	Consideraciones escenario operación sin carbón al 2030. Elaboración propia.	53
3.6	Resultados de emisiones proyectadas de dióxido de carbono. Elaboración propia.	54
3.7	Resultados de emisiones proyectadas de dióxido de azufre. Elaboración propia.	55
3.8	Resultados de emisiones proyectadas de óxidos de nitrógeno. Elaboración propia	56
3.9	Resultados de emisiones proyectadas de material particulado respirable. Elaboración propia.	57
3.10	Resultados de emisiones proyectadas de material particulado fino. Elaboración propia. . . .	58
4.1	Límites establecidos por el PDA de Tocopilla para las emisiones de material particulado respirable en toneladas al año. Reelaboración propia en base al decreto correspondiente. . .	62
4.2	Responsabilidad de emisiones de material particulado en procesos de combustión según fuente en Huasco. Reelaborado en base a datos entregados por el plan de prevención de Huasco.	63
4.3	Emisiones máximas permitidas de MP para el Complejo Termoeléctrico Guacolda. Reelaborado en base a plan de prevención de Huasco.	64
4.4	Responsabilidad de emisiones de fuentes puntuales en toneladas al año para diferentes contaminantes en la zona de Concón, Quintero y Puchuncaví. Extracto de tabla reelaborado a partir de plan de descontaminación de la zona mencionada.	65

4.5	Emisiones máximas permitidas para el Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES GENER. Reelaborado a partir de plan de descontaminación de la zona Concón, Quintero y Puchuncaví.	65
4.6	Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma en Coronel. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024b].	70
4.7	Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma entre 2021-2023 en Mejillones. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024d].	70
4.8	Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma entre 2021-2023 en Huasco. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024c].	71
4.9	Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma entre 2021-2023 en Concón - Quintero - Puchuncaví. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024e].	72
4.10	Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma en Coronel. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023b].	72
4.11	Valores de calidad del aire para NO ₂ en µg/m ³ según normativa nacional y directrices de la OMS.	74
4.12	Valores de calidad del aire para SO ₂ en µg/m ³ según normativa nacional y directrices de la OMS.	75
4.13	Valores de calidad del aire para MP ₁₀ en µg/m ³ según normativa nacional y directrices de la OMS.	78
4.14	Valores de calidad del aire para MP _{2,5} en µg/m ³ según normativa nacional y directrices de la OMS.	80
4.15	Datos obtenidos de centros de atención de urgencia de las comunas periféricas a la zona Tocopilla y Mejillones.	82
4.16	Datos obtenidos de centros de atención de urgencia de las comunas periféricas a la zona Coronel.	83
A.1	Factores de emisión de gases de efecto invernadero, en kg del gas respectivo por kg de carbón, extraídos a partir del informe IPCC 2006-2019 [Gómez et al., 2006].	99
A.2	Factores de emisión de contaminantes, en kg de contaminante respectivo por tonelada de carbón, extraídos a partir del informe AP-42 [U.S. Environmental Protection Agency, 1998].	100
B.1	Sistemas de abatimiento por entidad.	101
B.2	[Continuación tabla B.1.] Sistemas de abatimiento por entidad.	102
B.3	[Continuación tabla B.2.] Sistemas de abatimiento por entidad.	103
B.4	Eficiencias de sistema de abatimiento de NO _x consideradas versus obtenidas por transparencia en RETC.	104

B.5	Eficiencias de sistema de abatimiento de SO ₂ consideradas versus obtenidas por transparencia en RETC	105
B.6	Eficiencias de sistema de abatimiento de MP consideradas versus obtenidas por transparencia en RETC	106

INTRODUCCIÓN

El mundo enfrenta actualmente una crisis climática sin precedentes que exige transformaciones profundas en los sistemas de producción y consumo energético. Chile, catalogado como un país altamente vulnerable frente al cambio climático [Naciones Unidas, 1992], ha asumido compromisos concretos en esta materia, entre ellos, alcanzar la carbono-neutralidad al año 2050 [Ministerio del Medio Ambiente, 2022b].

Uno de los pilares fundamentales para cumplir este objetivo es la descarbonización de la matriz eléctrica, dado que el sector de generación de electricidad representa un 26% de las emisiones nacionales de Gases de Efecto Invernadero [Ministerio del Medio Ambiente, 2024b]. Dentro de este sector, las termoeléctricas a carbón contribuyen significativamente en cuanto a emisiones, además, son fuentes de contaminantes locales que afectan directamente a las comunidades aledañas.

Emisiones de dióxido de azufre, material particulado, óxidos de nitrógeno y cenizas que contienen elementos tóxicos como mercurio, arsénico y cadmio [U.S. Environmental Protection Agency, 2002] han sido ampliamente documentadas. En Chile, las comunas donde operan estas centrales han sido catalogadas como “zonas de sacrificio” debido a la cantidad de contaminantes que estas y otras industrias generan de forma histórica [Vivanco, 2022]. Diversos estudios han evidenciado que en estas localidades se registra una mayor prevalencia de enfermedades, particularmente respiratorias, generando una deuda ambiental y social, y reforzando así la necesidad de avanzar hacia una salida definitiva del carbón [Viviani et al., 2021].

Frente a este panorama, en 2019 se publicó un Plan de Retiro y/o Reconversión de Unidades a Carbón, en el cual entes públicos, privados, sociedad civil y gremios acordaron los primeros pasos a seguir para lograr un “cese gradual y seguro de las centrales a carbón” [Ministerio de Energía, 2019], destacando el cierre de un 30% de la capacidad instalada existente antes de realizado el acuerdo.

No obstante, el proceso de descarbonización ha experimentado incertidumbres en los últimos años. Ejemplo de ello es la reciente venta de las unidades a carbón restantes en la central Ventanas a una empresa sin compromisos públicos de retiro [AES Andes, 2024], así como la decisión de la central Guacolda de proponer una reconversión parcial hacia una mezcla de carbón y amoníaco, sin garantías de cumplimiento [Ministerio de Energía, 2024a].

En el presente documento se realizará un cálculo de las emisiones históricas generadas por las centrales a carbón en Chile entre 2015 y 2024, utilizando datos de consumo de carbón con el fin de analizar las emisiones históricas del parque termoeléctrico a carbón. Asimismo, se proyectarán las emisiones futuras bajo distintos escenarios hasta 2040. Contrastando un escenario tendencial (Business as Usual) con escenarios de descarbonización acelerada y cumplimiento de compromisos. Esto con el fin de estimar el impacto ambiental agregado de su operación prolongada y evaluar el grado de alineamiento con la normativa ambiental vigente y con recomendaciones nacionales de salud.

Objetivos

Principal

Analizar las emisiones del parque termoeléctrico a carbón en Chile en el período 2015-2040, considerando su relación con normativa ambiental y recomendaciones de salud.

Para cumplir el objetivo general presentado, se consideran los siguientes objetivos específicos.

Específicos

1. Clasificar las centrales termoeléctricas a carbón en operación en Chile, considerando ubicación, capacidad instalada y año de entrada en operación.
2. Revisar metodologías existentes para el cálculo de emisiones atmosféricas en centrales termoeléctricas.
3. Calcular las emisiones históricas generadas por las unidades de generación eléctrica a carbón en Chile, utilizando datos de consumo de carbón entre 2015 y 2024.
4. Proyectar las emisiones del parque termoeléctrico a carbón hasta el año 2040, considerando diferentes escenarios de descarbonización.
5. Evaluar el grado de cumplimiento de valores de emisión obtenidos por central respecto a la normativa ambiental chilena y recomendaciones internacionales de salud.

Capítulo 1

Estado del arte

Un análisis de emisiones por sector requiere de comprensión detallada tanto de sus características como de las metodologías existentes para estimar su impacto ambiental. Esta sección presenta un enfoque en estas dos secciones clave, por un lado, la caracterización técnica y operativa de las centrales a carbón en Chile, así como la evolución de sus principales relaciones con la matriz energética a lo largo de los años; y por otro, la revisión de enfoques y metodologías nacionales e internacionales existentes para el cálculo de emisiones atmosféricas.

1.1. Caracterización de las centrales a carbón en Chile

En 2019, el parque termoeléctrico nacional contaba con 28 unidades generadoras distribuidas en 12 centrales, ubicadas en las comunas de Iquique (Región de Tarapacá); Tocopilla y Mejillones (Región de Antofagasta); Huasco (Región de Atacama); Quintero y Puchuncaví (Región de Valparaíso); y Coronel (Región del Biobío). Estas instalaciones han desempeñado históricamente un rol relevante en la matriz energética nacional, debido a su aporte a la generación continua de electricidad y al fortalecimiento de la seguridad del suministro en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

El proceso formal de descarbonización comenzó en 2018, con la conformación de la Mesa de Retiro y/o Reconversión de Unidades a Carbón, iniciativa que posteriormente dio origen al plan del mismo nombre, donde empresas generadoras como Enel, Engie, Colbún y Aes Gener (hoy Aes Andes), realizaron de forma voluntaria compromisos de retiro progresivo de sus unidades a carbón, priorizando el cierre de aquellas con mayor antigüedad o menor eficiencia. Estos compromisos fueron formalizados mediante el Decreto Exento N°50 emitido por el Ministerio de Energía [Ministerio de Energía, 2020], con el horizonte de alcanzar una matriz libre de carbón al año 2040.

Durante los primeros años del plan se observaron grandes avances, para fines de 2020 ya habían cerrado cinco unidades, y hacia fines de 2024 ya se habían sumado otras seis, totalizando 11 unidades desconectadas.

Sin embargo, un ambiente de incertidumbre se ha generado con respecto a este proceso. Diversas unidades han sido vendidas a empresas que no suscribieron los acuerdos originales de cierre, como es el caso de la central Guacolda, adquirida por Guacolda Energía en 2021, y de las unidades remanentes de la central Ventanas, transferidas a Quintero Energía en 2024. Estas últimas no han anunciado fechas oficiales de retiro ni han solicitado su desconexión al Coordinador Eléctrico Nacional, lo que implica al menos una postergación hasta 2027, considerando que el procedimiento requiere de un aviso con dos años de anticipación.

Adicionalmente, Guacolda Energía ha propuesto una reconversión parcial de sus unidades a un esquema de co-combustión con amoníaco verde, estimando alcanzar una participación del 50% de este combustible al año 2033. Aunque esta estrategia representa una posible transición tecnológica, aún no existen garantías regulatorias ni operacionales que aseguren su implementación efectiva.

La tabla 1.1 presentada a continuación, presentan las unidades que han concretado su desconexión, en orden de año de inicio de operaciones.

Tabla 1.1: Unidades desconectadas. Elaboración propia en base a datos de cada empresa.

Unidad generadora	Capacidad Instalada [MW]	Comuna	Año puesta en servicio	Año de cierre
Ventanas 1	114	Puchuncaví	1964	2020
Bocamina U1	130	Coronel	1969	2020
Ventanas 2	208	Puchuncaví	1977	2023
Tocopilla-U12	85	Tocopilla	1983	2019
Tocopilla-U13	86	Tocopilla	1985	2019
Tocopilla-U14	136	Tocopilla	1987	2022
Tocopilla-U15	132	Tocopilla	1990	2022
Norgener-NT01	141	Tocopilla	1995	2024
Norgener-NT02	141	Tocopilla	1997	2024
Tarapacá	158	Iquique	1998	2019
Bocamina II	348	Coronel	2012	2022

En las siguientes subsecciones se profundizará en la evolución histórica de los elementos que permiten comprender de forma más precisa el estado actual del parque termoeléctrico en Chile.

1.1.1. Clasificación y evolución de la capacidad instalada a carbón

Hasta finales de 2024, la implementación del plan de descarbonización ha resultado en una reducción del 26% de la capacidad instalada de generación a carbón respecto al 2019, el año de mayor capacidad instalada histórica. La figura 1.1 ilustra la evolución temporal de la capacidad instalada por empresa generadora, evidenciando la salida progresiva de unidades desde el 2019.

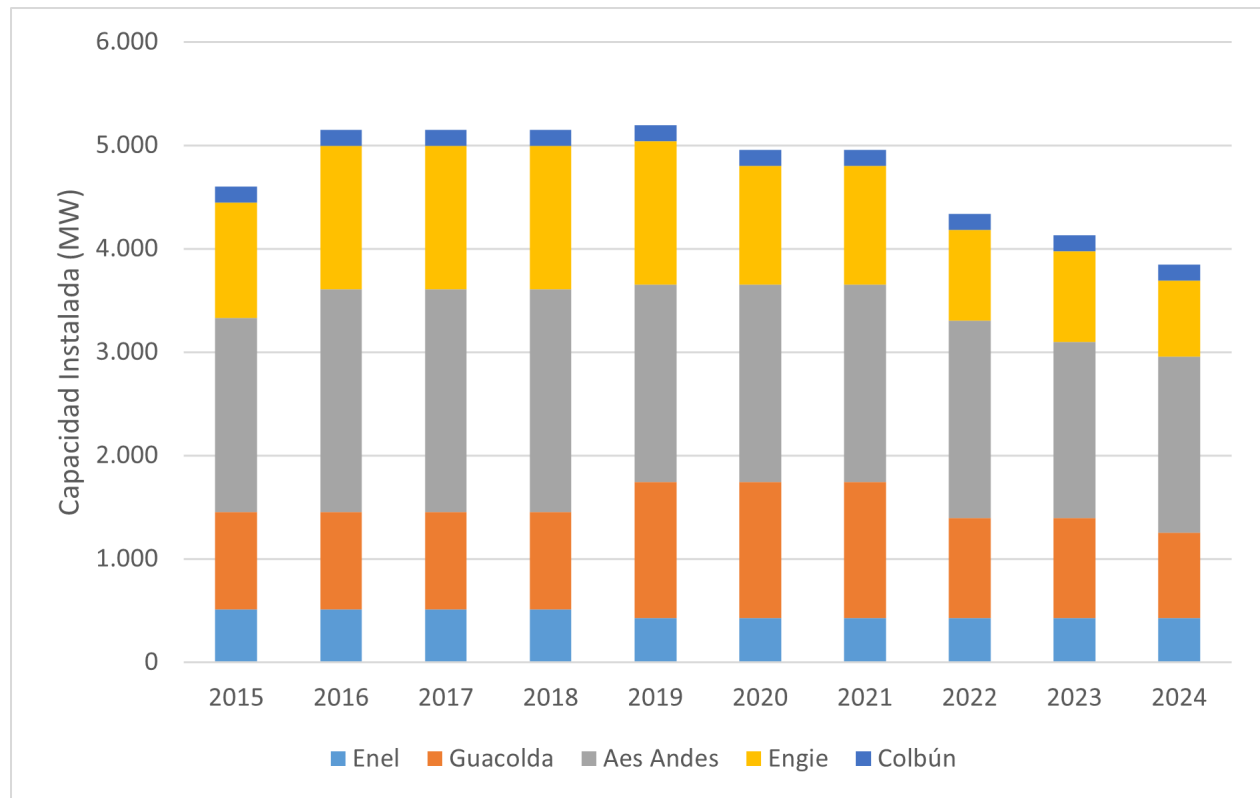


Figura 1.1: Gráfico de evolución anual de capacidad instalada en MW. Elaboración propia en base a datos entregados por las empresas.

A su vez, la tabla 1.2 detalla el estado operativo de las unidades remanentes al año 2025, clasificándolas según empresa, año de puesta en servicio y compromisos de cierre vigentes.

Tabla 1.2: Clasificación de unidades a carbón existentes a 2025. Elaboración propia en base a datos de cada empresa.

Unidad generadora	Capacidad Instalada [MW]	Comuna	Año puesta en servicio	Fecha de cierre programado
Guacolda-U1	154	Huasco	1995	dic-2030
Mejillones-CTM1	162	Mejillones	1996	dic-2025
Guacolda-U2	145	Huasco	1996	dic-2030
Mejillones-CTM2	172	Mejillones	1998	dic-2025
Guacolda-U3	154	Huasco	2009	dic-2033
Nueva Ventanas	267	Puchuncaví	2010	Indefinido*
Guacolda-U4	154	Huasco	2010	dic-2033
Angamos-ANG1	277	Mejillones	2011	dic-2025
Andina-CTA	177	Mejillones	2011	dic-2025
Hornitos-CTH	178	Mejillones	2011	dic-2025
Angamos-ANG2	281	Mejillones	2011	dic-2025
Santa María	370	Coronel	2012	dic-2040
Campiche	272	Puchuncaví	2013	Indefinido*
Guacolda-U5	156	Huasco	2015	dic-33
Cochrane-CCR1	275	Mejillones	2016	dic-2040
Cochrane-CCR2	275	Mejillones	2016	dic-2040
IEM1	377	Mejillones	2019	dic-2025

**Las centrales con fecha de cierre indefinida se deben a que no cumplieron su compromiso de cierre a 2025 y no han dado aviso al coordinador ni presentado una nueva fecha de cierre programado.*

1.1.2. Generación de energía por central

La reducción en la generación eléctrica ha sido proporcionalmente mayor que la reducción en capacidad instalada. En particular, entre 2017 y 2023, la generación de energía a partir de carbón disminuyó en un 52%. Esto indica un decline en la utilización de las unidades activas, lo cuál se da debido a la alta penetración de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), y criterios de despacho económico.

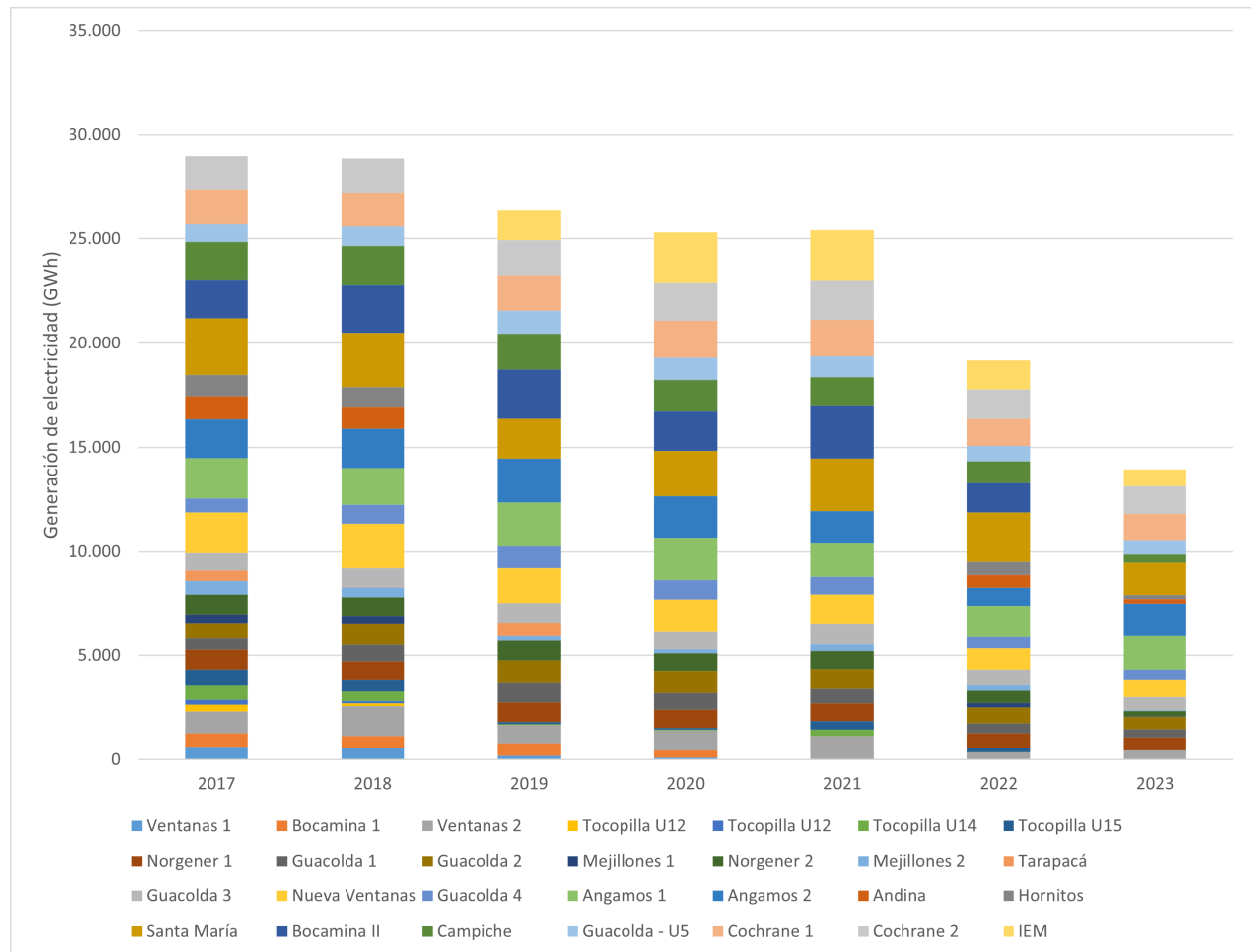
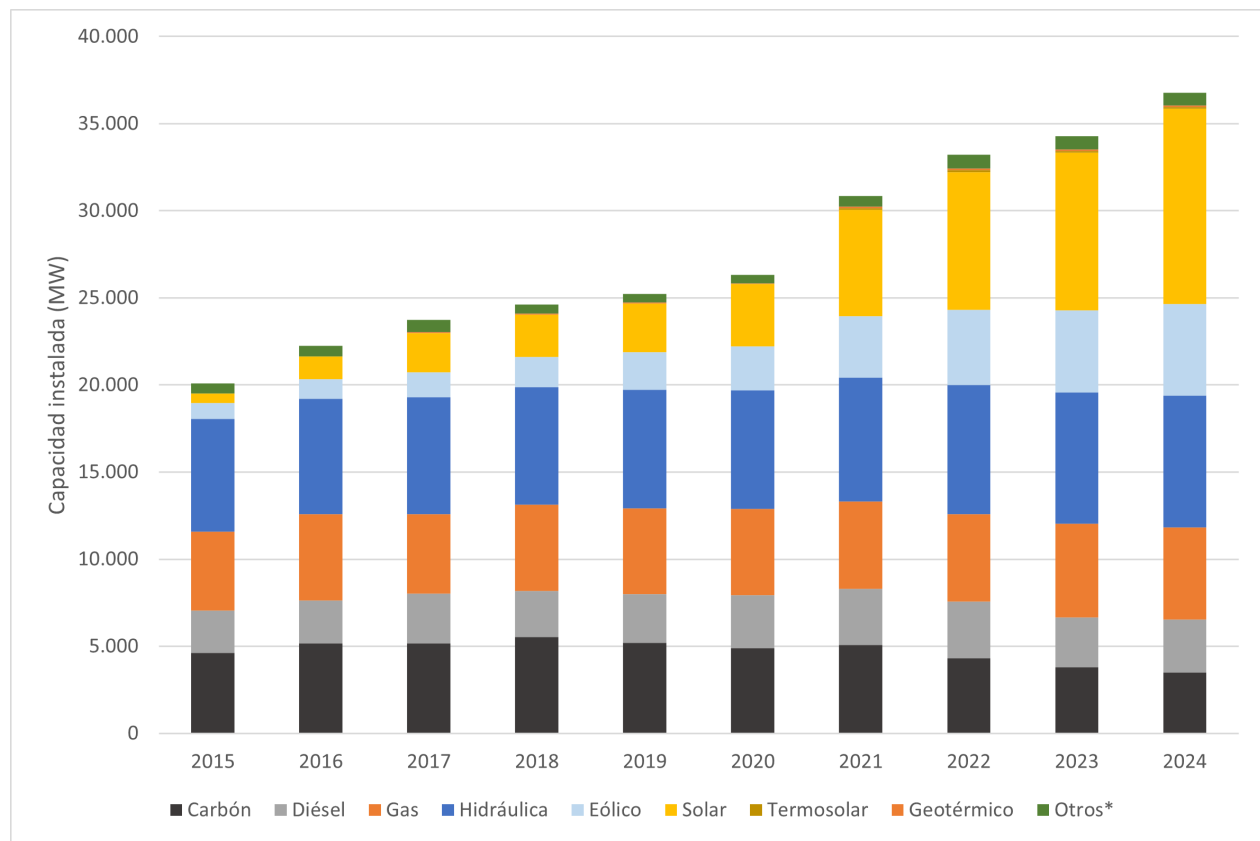


Figura 1.2: Evolución anual de generación eléctrica en GWh por central. Elaboración propia en base a datos de la CNE [Comisión Nacional de Energía, 2025b].

1.1.3. Participación en matriz energética

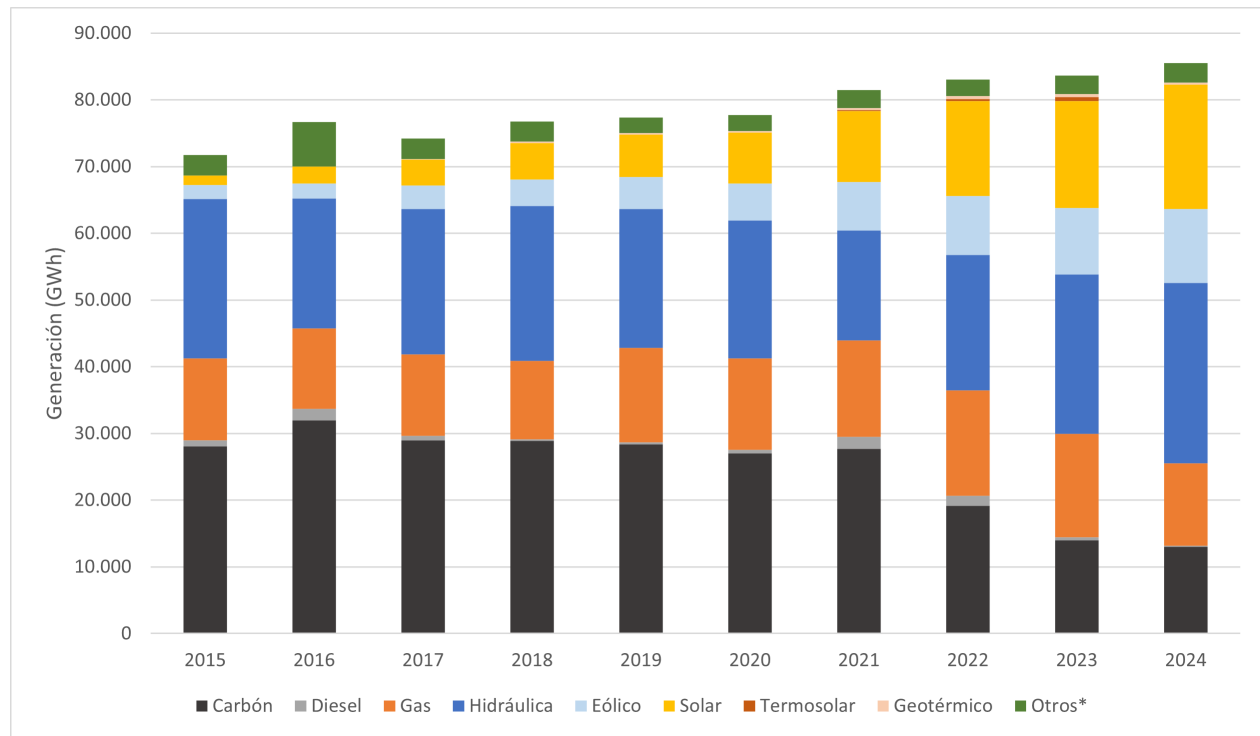
Es importante considerar que la matriz eléctrica nacional no se mantiene estática mientras ocurre el proceso de descarbonización. Sólo entre 2015 y 2024 la capacidad instalada total del país aumentó 1,8 veces, impulsada por la inversión en tecnología solar y eólica. En este mismo período, la participación porcentual del carbón en capacidad instalada disminuyó de 23% a 9,5%.



**Otros incluye: Fuel Oil, Biomasa, Biogás, Cogeneración y Petcoke.*

Figura 1.3: Evolución anual de capacidad instalada bruta por tecnología en MW. Elaboración propia en base a datos del Coordinador Eléctrico Nacional [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025a].

En términos de generación eléctrica, se observa una tendencia similar: la generación total aumentó 1,2 veces, mientras que la participación de las centrales a carbón disminuyó del 39% al 15% entre 2017 y 2024.



*Otros incluye: Fuel Oil, Biomasa, Biogás, Cogeneración y Petcoke.

Figura 1.4: Evolución anual de generación eléctrica por tecnología en GWh. Elaboración propia en base a datos del Coordinador Eléctrico Nacional [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025b].

En términos generales, se observa una reducción significativa tanto en la capacidad instalada como en la generación y el consumo del carbón, lo que ha permitido una disminución en la participación relativa del carbón dentro de la matriz energética nacional. Este descenso ha sido acompañado por un crecimiento sostenido de las fuentes renovables, especialmente solar y eólica.

1.2. Emisiones atmosféricas y tecnologías de abatimiento

La combustión del carbón mineral genera un impacto significativo en la calidad de aire, emitiendo gases de efecto invernadero y contaminantes locales que puedan afectar la salud pública. Sin embargo, para mitigar estos efectos existen tecnologías de abatimiento de emisiones que con el tiempo han ido mejorando considerablemente su desempeño.

1.2.1. Emisiones

Entre los más relevantes se encuentran los óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado, monóxido de carbono, así como gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono y metano. Además, se generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles y metales traza como el mercurio.

Tabla 1.3: Breve descripción de las emisiones propias de las termoeléctricas a carbón. Elaboración propia.

Contaminante / GEI	Descripción
Dióxido de carbono (CO ₂)	Durante la combustión, la mayor parte del carbono presente en el combustible se oxida a CO ₂ , incluso bajo condiciones de combustión relativamente incompletas. Aunque no afecta directamente la salud humana en concentraciones ambientales típicas, es el principal gas de efecto invernadero asociado al cambio climático, con efectos indirectos sobre bienestar y salud global.
Monóxido de carbono (CO)	Se forma cuando la combustión es incompleta. Su presencia indica una oxidación deficiente del combustible. El CO tiene una alta afinidad por la hemoglobina, reduciendo el transporte de oxígeno en la sangre, lo que puede provocar mareos, cefaleas, pérdida de conciencia e incluso muerte en altas concentraciones.
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Se originan en parte por la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible y en el aire. Están compuestos principalmente por (NO), con proporciones menores de (NO ₂). Estos contaminantes contribuyen a la formación de ozono troposférico, asociado a impactos en la salud respiratoria, especialmente en personas con enfermedades crónicas.
Dióxido de azufre (SO ₂)	Cerca del 95% del azufre presente en el combustible se transforma en SO ₂ durante la combustión. Este gas puede reaccionar en la atmósfera para formar sulfatos, parte del material particulado fino. El SO ₂ es un irritante respiratorio que agrava síntomas en personas asmáticas y puede generar inflamación bronquial, también es causante de daño cardiovascular agudo. En el largo plazo, puede generar daño crónico respiratorio y afectar el correcto desarrollo fetal [Centro Nacional del Medio Ambiente, 2015].
Material particulado (MP)	Incluye cenizas provenientes de la combustión y partículas de carbono no quemado. Su tamaño (especialmente MP _{2,5}) determina su capacidad de ingresar profundamente al sistema respiratorio. Está asociado a aumento de enfermedades cardiovasculares, respiratorias, cáncer, y mortalidad prematura.
Metano (CH ₄)	Se forma en pequeñas cantidades durante la combustión, especialmente bajo condiciones de baja temperatura o combustión incompleta. No es tóxico en niveles ambientales habituales, pero es un potente gas de efecto invernadero, con impactos indirectos sobre salud a través del cambio climático.

Actualmente, el Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes (RETC) constituye la principal fuente de información pública sobre emisiones atmosféricas provenientes de fuentes puntuales. Esta base de datos permite identificar y desagregar las emisiones generadas específicamente por las calderas a carbón.

1.2.2. Sistemas de abatimiento

La reducción de emisiones en centrales termoeléctricas a carbón se logra mediante la implementación de sistemas de abatimiento, es decir, tecnologías diseñadas para capturar, transformar o neutralizar los contaminantes antes de que sean liberados a la atmósfera. Estos sistemas cumplen un rol clave en el cumplimiento de normativas ambientales y en la mitigación de impactos locales asociados a la calidad del aire.

A continuación, se presentan los principales sistemas de abatimiento utilizados en las centrales a carbón en Chile, agrupados por tipo de contaminante que controlan.

Control de óxidos de azufre SO_x

Desulfuración de gases: La desulfuración de gases de combustión consiste en remover el dióxido de azufre (SO_2) presente en los gases generados por la quema de carbón. Esto se logra comúnmente mediante procesos de lavado con soluciones alcalinas, como cal o piedra caliza, que reaccionan químicamente con el SO_2 para formar compuestos inertes como el sulfato de calcio (yeso). Esta tecnología es ampliamente utilizada a nivel internacional, especialmente en unidades de gran tamaño o alto contenido de azufre en el combustible [Suárez-Ruiz and Ward, 2008].

Control de óxidos de nitrógeno NO_x

Quemadores low NO_x : Debido al poco nivel de reacción del nitrógeno en condiciones normales, las emisiones de óxidos de nitrógeno perciben un peak de generación a muy altas temperaturas, por lo que estos dispositivos están diseñados para disminuir la temperatura de la zona de combustión, retrasando la mezcla de aire y combustible, resultando en una llama más grande y equilibrada con una temperatura máxima más baja. Para ello, emplean técnicas como la combustión en etapas o configuraciones de llama más estables y uniformes. [Wu, 2002].

Reducción Catalítica Selectiva (SCR): La tecnología SCR consiste en la inyección de un agente reductor, como amoníaco o urea, en los gases de precombustión, que luego pasan por un reactor catalítico. En este proceso, el NO_x reacciona químicamente con el agente reductor, transformándose en nitrógeno molecular (N_2) y vapor de agua. [U.S. Environmental Protection Agency, 2002].

Material particulado MP

Filtro de mangas: También conocido como filtro de tela, este sistema se basa en una separación física del material particulado. Los gases se hacen pasar a través de múltiples bolsas de tela, en las cuales quedan retenidas las partículas sólidas. El polvo acumulado se remueve periódicamente mediante vibración mecánica o inyección de aire comprimido, y es posteriormente dispuesto en los sistemas de recolección adecuados. [U.S. Environmental Protection Agency, 2002].

Precipitador Electrostático: Esta tecnología utiliza un campo eléctrico de alta tensión para cargar las partículas suspendidas en los gases de combustión. Estas partículas, al ser ionizadas, son atraídas y depositadas sobre placas metálicas de recolección. Posteriormente, se eliminan mediante sistemas de limpieza mecánica. [U.S. Environmental Protection Agency, 2002].

La caracterización de los contaminantes causados por la combustión a carbón es esencial para evaluar el impacto ambiental del parque termoeléctrico chileno y establecer así medidas de mitigación eficaces. Las centrales cuentan con una variedad de sistemas de abatimiento que permiten reducir significativamente la

emisión de SO_x , NO_x y material particulado, aunque su efectividad está sujeta al mantenimiento y actualización tecnológica.

1.3. Estimación de emisiones

Esta sección presenta una revisión de los principales marcos metodológicos utilizados para el cálculo de emisiones, comenzando por los enfoques internacionales más reconocidos, y finalizando con las metodologías adaptadas y empleadas al contexto chileno.

1.3.1. Metodologías internacionales

A nivel internacional, distintas organizaciones y agencias han desarrollado metodologías estandarizadas para estimar las emisiones atmosféricas, con el objetivo de generar inventarios confiables que sirvan de base para la toma de decisiones en materia de políticas públicas, salud y medio ambiente. A continuación, se presentan tres principales referentes.

IPCC 2006-2019

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha establecido una serie de directrices ampliamente utilizadas por los países para la elaboración de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, llamándose estas “Directrices del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero 2006”, las cuales se complementaron en 2019. [Gómez et al., 2006]

Estas incluyen el marco metodológico de referencia para la estimación, reporte y verificación de emisiones de diversas fuentes, con distintos niveles de complejidad, permitiendo así a los países ajustar el nivel de detalle de sus estimaciones según su capacidad técnica y disponibilidad de datos.

Agencia de Protección Ambiental

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), es un organismo gubernamental dedicado a la protección del medio ambiente y a la salud humana. La EPA ha desarrollado la herramienta de estimación de emisiones “AP 42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources” el cuál recibe actualizaciones de forma constante. [U.S. Environmental Protection Agency, 1998]

Agencia Europea del Medio Ambiente

La agencia Europea del Medio Ambiente (EAA) entrega directrices técnicas para la estimación de emisiones atmosféricas en Europa. Su metodología se explica en la guía “EMEP/EAA air pollutant emission inventory guidebook 2016”. Donde proporciona metodologías detalladas por diferentes sectores industriales.

1.3.2. Metodologías nacionales

En el contexto chileno, es el Ministerio del Medio Ambiente el organismo encargado de diseñar y aplicar políticas, planes y programas relacionados con la protección ambiental. Bajo su dependencia operan instituciones como la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), la cual fiscaliza el cumplimiento normativo ambiental.

También, mantiene plataformas digitales como el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) y el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC).

En cuanto a la estimación de emisiones atmosféricas, Chile cuenta con metodologías nacionales que toman en cuenta referencias internacionales como los del IPCC y la EPA y buscan adaptarlos a la realidad regulatoria y operativa del país. Si bien ambos utilizan bases metodológicas distintas, ambos se podrían considerar complementarios, siendo el primero más enfocado en gases de efecto invernadero, y el segundo en contaminantes atmosféricos locales y en sustancias tóxicas.

Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)

El RETC es una base de datos pública administrada por el MMA, cuyo objetivo es capturar, recopilar, conservar, analizar y difundir información sobre emisiones, residuos y transferencias de contaminantes potencialmente dañinos para la salud humana y el medio ambiente. La definición y alcance del RETC se encuentran regulados en el artículo 1 del Decreto Supremo N.º 1/2013 del MMA. Actualmente, contempla 121 contaminantes dentro de sus registros.

En el caso del subsector de generación eléctrica, el RETC, mediante su guía metodológica actualizada en 2019 considera las emisiones provenientes de calderas de vapor, motores de generación eléctrica y turbinas, utilizados tanto para la generación de electricidad como para la producción de vapor en procesos industriales [Ministerio del Medio Ambiente, 2019e]. Para este sector, el registro entrega factores de emisión específicos para distintos tipos de contaminantes, incluyendo contaminantes locales, material particulado, contaminantes climáticos, compuestos tóxicos, dioxinas y furanos, y compuestos orgánicos como xileno y etileno, entre otros. Se construye utilizando diversas fuentes de información, como el IPCC, la AP42, y el EMEP/EAA 2016.

Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI)

El INGEl es otro instrumento clave de estimación de emisiones en Chile, orientado a proporcionar información sobre la magnitud y tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, con el fin de diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Es elaborado por el MMA y se construye utilizando las directrices metodológicas del IPCC.

El inventario considera emisiones y remociones de GEI provenientes de cinco sectores principales: Energía; Procesos industriales y uso de productos (IPPU); Agricultura; Uso de la tierra y cambio de uso de la tierra y

silvicultura (UTCUTS); y Residuos.

1.4. Conclusiones del estado del arte

El presente capítulo ha abordado los elementos fundamentales para comprender el funcionamiento, impacto y evaluación ambiental de las centrales termoeléctricas a carbón en Chile. Revisando la evolución del parque termoeléctrico nacional desde antes del inicio del proceso de descarbonización, profundizándose en la información disponible sobre los contaminantes generados por la combustión a carbón y sistemas de abatimiento actualmente utilizados en unidades nacionales.

Para concluir el estado del arte, se revisaron metodologías internacionales y nacionales disponibles para la estimación de emisiones. Estas metodologías constituyen la base sobre la cual se construyen los inventarios de emisiones, y permiten establecer comparaciones, verificar tendencias y proyectar escenarios futuros de operación y cierre.

Capítulo 2

Cálculo de emisiones históricas

La estimación de las emisiones generadas por la combustión a carbón en las termoeléctricas a carbón presentes desde 2015 hasta la fecha se basa en un enfoque de Factores de Emisión (FE), adaptado de las directrices internacionales (IPCC y EPA) y contextualizando a la realidad operativa chilena.

Este capítulo define la ecuación de cálculo y caracteriza las tres variables clave requeridas para cada unidad generadora:

1. Los factores de emisión asociados a la tecnología de combustión.
2. La calidad del carbón, como contenido de azufre y cenizas, utilizado como combustible.
3. La eficiencia de los sistemas de abatimiento instalados en cada unidad.

2.1. Metodología de cálculo

La estimación de emisiones, tanto de gases de efecto invernadero (GEI) como de contaminantes locales, se basa en la ecuación (2.1) que relaciona el consumo de combustible con los factores de emisión y eficiencia de los sistemas de control.

$$\text{Emisión} = \text{Consumo} \times FE \times \left(1 - \frac{AB}{100}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

- Emisión: Corresponde a la masa del contaminante o GEI emitido, en kton de contaminante.
- Consumo: Corresponde al consumo de combustible, en kton de carbón.
- FE : Corresponde al factor de emisión del contaminante, sin abatimiento, en kton de contaminante por kton de carbón.

- *AB*: Corresponde a la eficiencia del sistema de abatimiento instalado para ese contaminante, adimensional.

Los contaminantes y GEI seleccionados para este análisis corresponden a gases de efecto invernadero resultantes de la combustión, además de los principales contaminantes presentes en la normativa chilena, junto con la fuente metodológica principal para sus factores de emisión se detallan en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Detalle de contaminantes contemplados, junto con las fuentes metodológicas respectivas utilizadas para el cálculo. Elaboración propia.

Contaminante / GEI	Fuente
Dióxido de carbono (CO ₂)	IPCC 2006
Metano (CH ₄)	IPCC 2006
Monóxido de carbono (CO)	AP42
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	AP42
Dióxido de azufre (SO ₂)	AP42
Material particulado (MP _{2.5} y MP ₁₀)	AP42

2.1.1. Consumo de combustible

El consumo de carbón utilizado corresponde al reportado por las centrales termoeléctricas a la Comisión Nacional de Energía (CNE). Esta información, suministrada de forma periódica, distingue por tipo de combustible, y, en el caso del carbón, se expresa en toneladas métricas.

A continuación, se presenta un gráfico representando los datos históricos entregados por la CNE, que recorren desde el 2008 hasta la fecha, nótese el peak de generación eléctrica a carbón ocurrido en 2016, seguido de una declinación gradual.

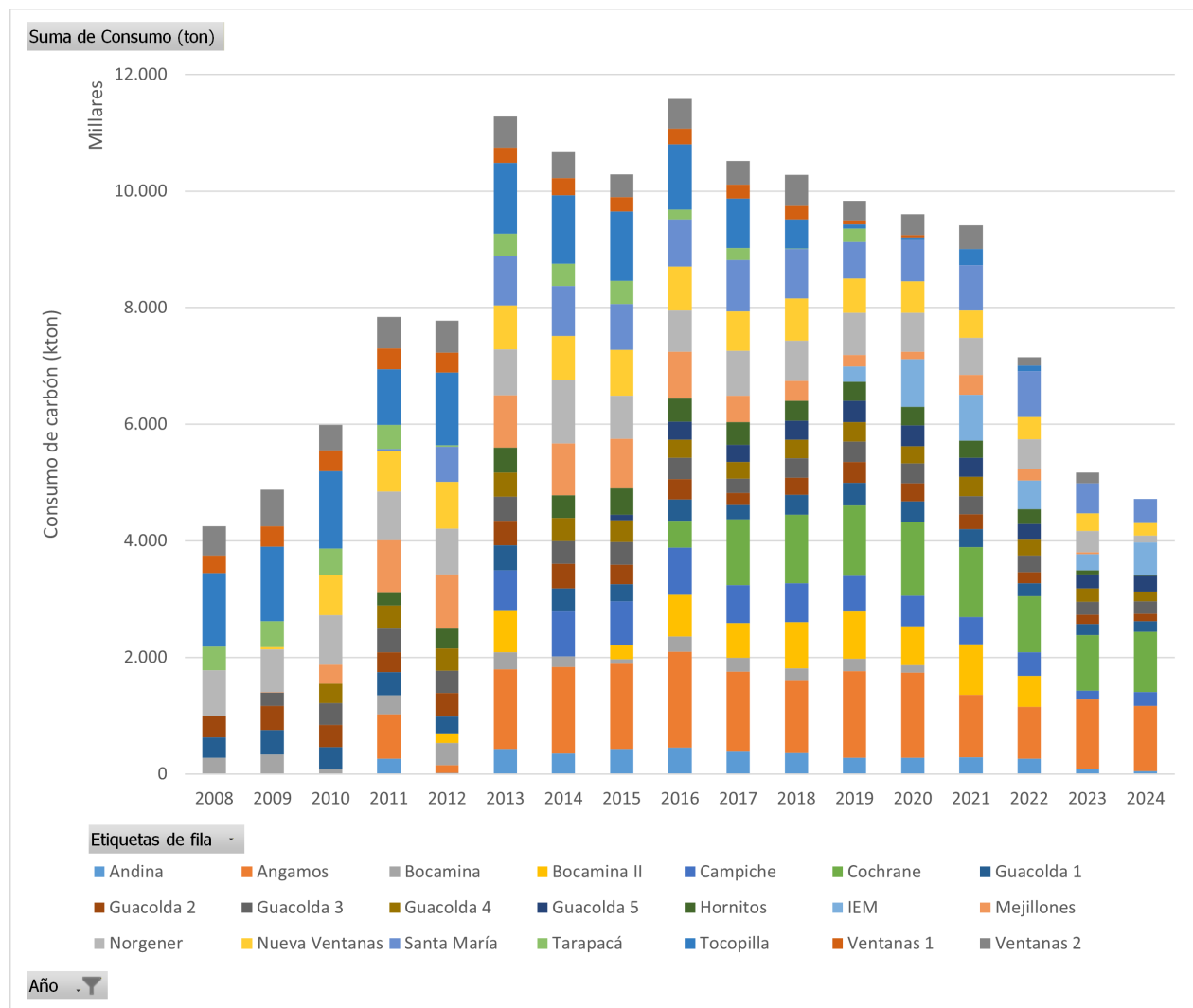


Figura 2.1: Evolución anual de consumo de carbón en kilotoneladas por entidad declarada. Elaboración propia en base a datos de la CNE [Comisión Nacional de Energía, 2025a].

Como consideración, los datos entregados no clarifican en qué porcentaje se consume carbón bituminoso o sub-bituminoso, lo cuál se considera posteriormente una de las limitaciones de los cálculos a realizar.

Además, resulta interesante mostrar como ha evolucionado el consumo de las centrales a carbón, separandolas en tres categorías, cierre antes de 2025, en 2025 y finalmente un cierre posterior (Figura 2.2). Del que se puede destacar que las centrales que tienen promesa de cierre a finales de 2025 consisten en un aporte significativo a la generación a carbón histórica.

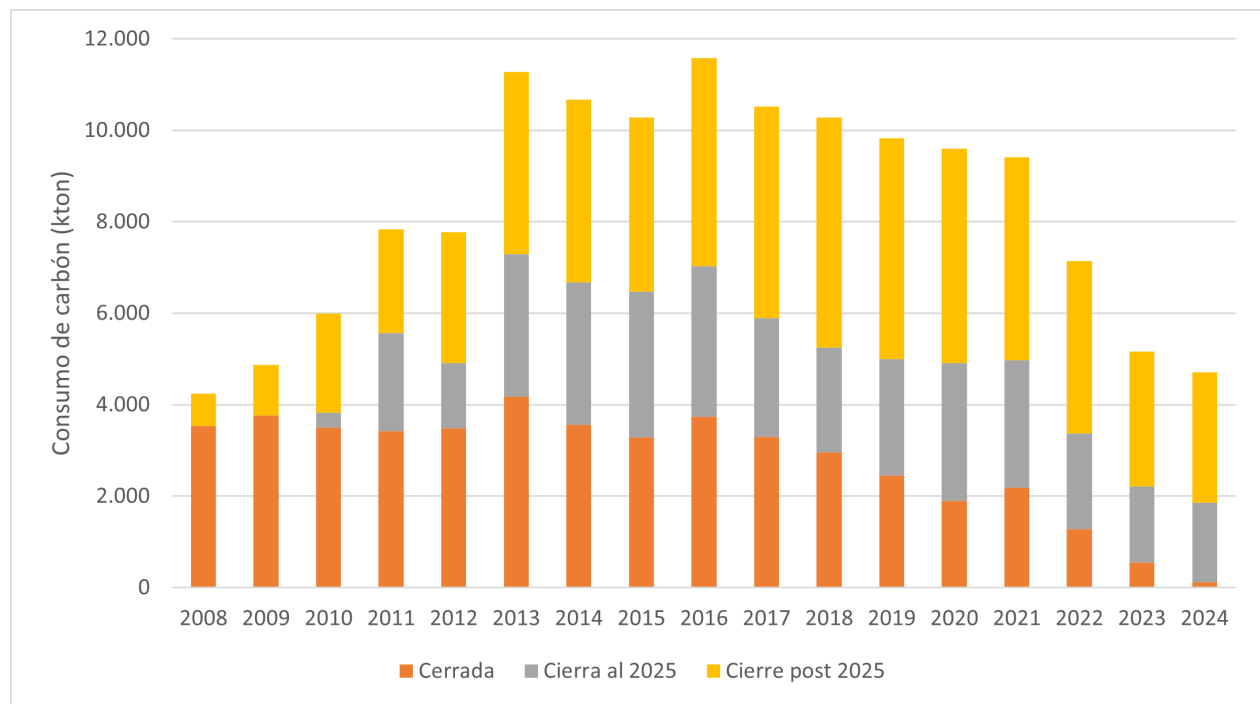


Figura 2.2: Evolución anual de consumo de carbón en kilotoneladas clasificación según fecha de cierre. Elaboración propia en base a datos de la CNE [Comisión Nacional de Energía, 2025a].

2.1.2. Factores de emisión

La correcta selección de un factor de emisión (FE) adecuado es necesaria para la precisión del cálculo. Las metodologías internacionales difieren en su enfoque.

Las directrices del IPCC se utilizan para los GEI CO_2 , CH_4 y N_2O . El IPCC distingue principalmente por tipo de combustible, ya que la emisión depende del contenido de carbono [Gómez et al., 2006]. En Chile, se utiliza carbón bituminoso y sub-bituminoso, el primero con un mayor poder calorífico (entre 5800 y 7800 kcal/kg), y el segundo con menor poder calorífico (entre 4600 y 5400 kcal/kg).

Las directrices AP-42 se utilizan para con contaminantes NO_x , SO_2 , $\text{MP}_{2.5}$ y MP_{10} . La EPA diferencia los factores según la tecnología de caldera y el tipo de carbón.

Según lo investigado, las centrales chilenas utilizan principalmente dos tipos de tecnologías de combustión: Combustión de carbón pulverizado (PC) y Combustión de lecho fluidizado (FC). Ambos procesos son descritos a continuación, según el "EPA Air Pollution Control Cost Manual" [U.S. Environmental Protection Agency, 2002].

Combustión de carbón pulverizado (PC): El carbón se pulveriza antes de ser inyectado en la cámara. Estas calderas se sub-clasifican según el manejo de la ceniza, que puede tener un fondo seco o húmedo, y

la disposición de los quemadores, si se encuentran en una, dos paredes, o de forma tangencial, es decir, los quemadores se encuentran en una esquina. Las calderas tangenciales, al tener mayor espacio, suelen operar a temperaturas ligeramente menores, reduciendo la generación térmica de NO_x .

Combustión de lecho fluidizado (FC): Utilizada en unidades como Andina y Hornitos, esta tecnología utiliza como lecho un material a base de calcio para capturar el SO_2 liberado en el proceso de combustión, el cual se convierte en un sulfato sólido y se elimina en el mismo equipo de control de material particulado. Además, opera a temperaturas significativamente más bajas (aproximadamente 930°C versus el rango de $1430 - 1760^\circ\text{C}$ en PC), Esto reduce naturalmente la formación de NO_x .

Los factores de emisión por tecnología, basados en la AP-42 y adaptados al parque nacional, se encuentran detallados en el Anexo A de este documento.

2.1.3. Calidad del carbón

La calidad del carbón influye directamente en el cálculo de SO_2 , por su contenido de azufre, y en el Material Particulado, por su contenido de cenizas.

Si bien Aduanas no reporta públicamente estas características en las importaciones, la CNE caracteriza de forma periódica los carbones importados en Chile. La tabla 2.2 muestra los promedios según país de procedencia.

Tabla 2.2: Características promedio del carbón importado a Chile entre 2015 y 2017.

Característica	Unidad	Australia	Colombia	Canadá	EEUU
Poder Calorífico	[kcal/kg]	6.669	6.474	6.716	6.144
Contenido de Azufre	[%]	0.46	0.64	0.24	0.46
Humedad	[%]	11.7	12.8	10.4	16.0

Fuente: Revisión de la Metodología de Cálculo del Precio de Paridad de Importación del Carbón Mineral a Chile, SCG consultaría a pedido de la Comisión Nacional de Energía.

Para el contenido de cenizas, se utilizaron las cotizaciones referenciales del mismo informe, manteniéndose dentro de los rangos señalados por el RETC.

Tabla 2.3: Características de carbón utilizadas por RETC. Extracto de guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales, 2019.

Combustible	S, PPM, MÁX. RM	S, PPM, MÁX. OTRAS REGIONES	A, % MÁX. RM	A, % MÁX. OTRAS REGIONES
Carbón	1-3% m/m	1-3% m/m	349% m/m	3-49% m/m

2.1.4. Eficiencias de abatimiento

El último componente de la ecuación corresponde a la eficiencia de los sistemas de abatimiento post-combustión, cuya presencia y efectividad varía entre unidades.

Las eficiencias utilizadas provienen del estudio “Variables ambientales y sociales para el cierre o reconversión de generación eléctrica a carbón” publicado por Inodú [Inodú, 2018], así como informes de centrales, complementado y comparado con registros del RETC obtenidos vía transparencia. Debido al año de referencia del estudio, se considera que los sistemas de abatimiento existen desde 2015. A continuación, en la tabla 2.4 se presentan los sistemas de abatimiento considerados para seis unidades a carbón. La tabla completa se presenta en el Anexo B.

Tabla 2.4: Sistemas de abatimiento por entidad.

Unidad	Inicio de operaciones	Abatimiento de NO _x	Abatimiento de SO ₂	Abatimiento de MP
Andina-CTA	2011	No aplica	Caldera lecho fluidizado con inyección de caliza	Precipitador electrostático*
Hornitos-CTH	2011	No aplica	Caldera lecho fluidizado con inyección de caliza	Precipitador electrostático*
Angamos-ANG1	2011	Quemadores low NO _x **	FGD, semi-seco*	Filtro de mangas*
Angamos-ANG2	2011	Quemadores low NO _x **	FGD, semi-seco*	Filtro de mangas*
Bocamina-U1	1969	-	FGD*	Filtro de mangas*
Bocamina-U2	2012	-	FGD*	Filtro de mangas*

*Sistemas de abatimiento presentes en el RETC.

**Fuente: Informe de fiscalización ambiental, SMA, 2019.

En el Anexo B se presentan las eficiencias obtenidas para cada sistema de abatimiento de NO_x, SO₂ y MP, junto a sus diferencias respecto al RETC.

Como consideración, las eficiencias presentadas vía transparencia por RETC son diferentes a las declaradas por las empresas. Además, existen casos particulares como la central IEM, que reporta eficiencias diferenciadas por contaminante incluyendo valores específicos para MP, MP_{2.5} y MP₁₀, y la central Guacolda, que combina filtros de mangas y precipitadores electrostáticos dependiendo de la unidad.

Una vez definida la metodología y caracterizadas las variables de entrada, se procede al cálculo de las emisiones históricas. Los resultados de esta estimación se presentan en la siguiente sección.

2.2. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la estimación de emisiones por contaminante, junto con su comparación respecto a los valores reportados por el RETC. En casos de interés, se muestran resultados agrupados anualmente por central, para otros casos, se remiten a los anexos.

2.2.1. Dióxido de carbono

La comparación entre la estimación de emisiones históricas de CO₂ realizada y los valores reportados con el RETC muestra una alta consistencia, como se presenta en la figura 2.3.

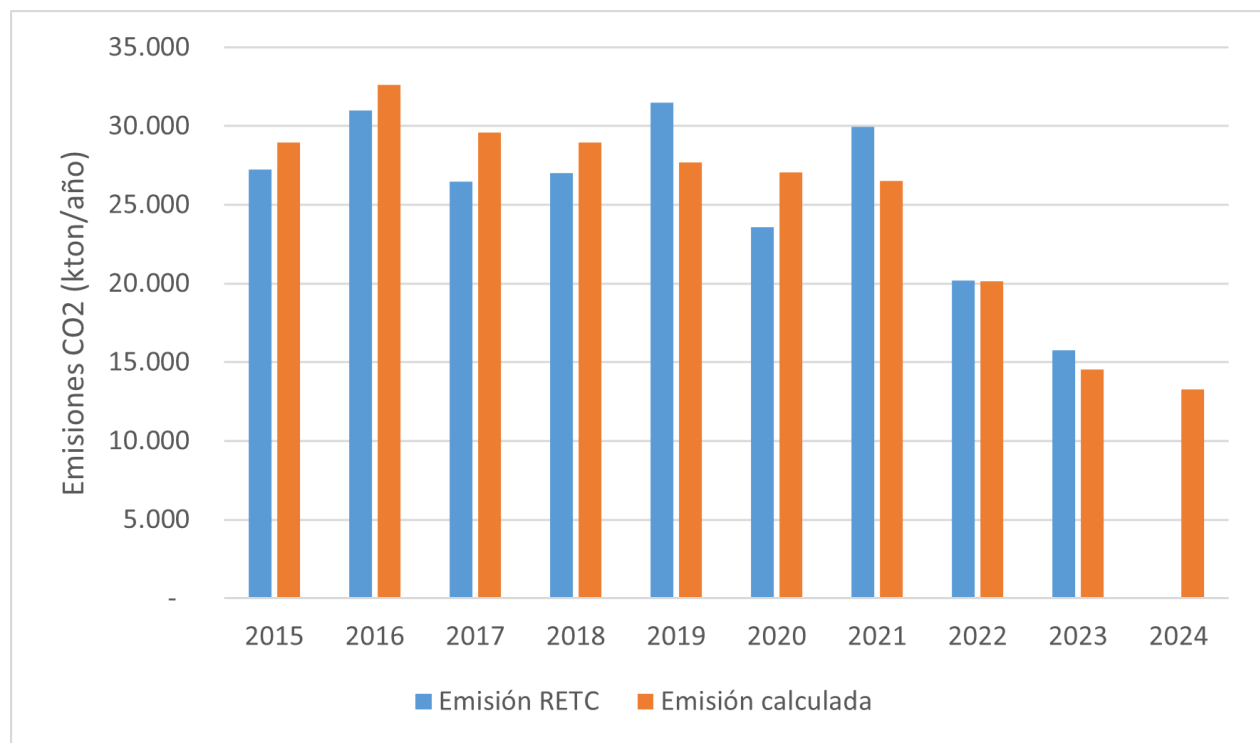


Figura 2.3: Comparación de emisiones de dióxido de carbono obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.

Este gas depende mayormente del tipo de combustible utilizado, más allá del tipo de tecnología utilizado por la central. Para el cálculo se asumió el uso exclusivo de carbón sub-bituminoso, lo que explica el resultado levemente menor.

Un factor no considerado en el cálculo de emisiones es que las unidades Andina y Hornitos tienen una producción singular de CO, como se explicará más adelante. Una mayor generación de CO implica una menor oxidación a CO₂, pero cuantificar ese efecto requiere información adicional sobre recirculación de gases y aprovechamiento de CO, la cual no se encuentra públicamente disponible. Esto tampoco se menciona

en la Guía Metodológica del RETC.

2.2.2. Monóxido de carbono

En este contaminante se observa que las emisiones reportadas antes del cambio metodológico del RETC son considerablemente inferiores a las estimadas en este estudio.

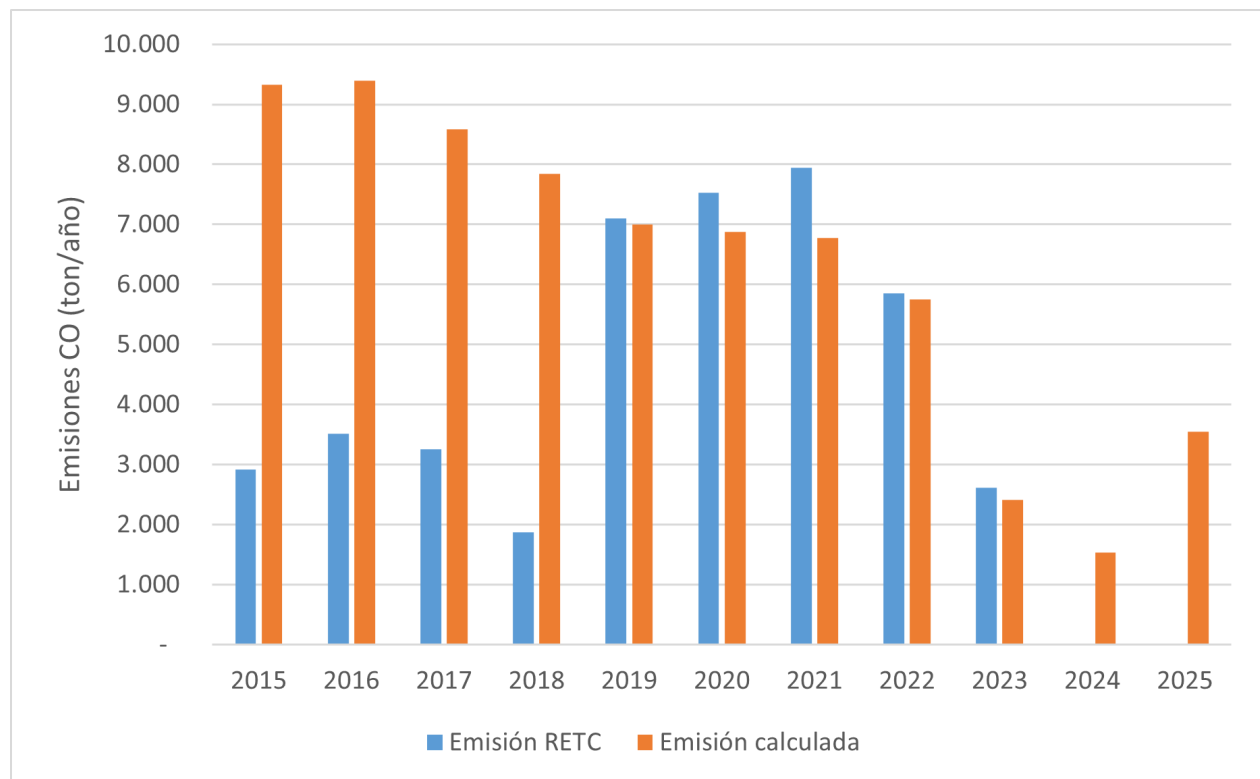


Figura 2.4: Comparación de emisiones de monóxido de carbono obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.

Esto es consistente con el hecho de que las principales emisoras de CO son las unidades Andina y Hornitos, que utilizan tecnología de lecho fluidizado, la cual opera a menor temperatura y genera mayores cantidades de CO. Según AP-42, el factor de emisión de estas unidades es aproximadamente 36 veces mayor que el de las unidades PC (18 lb/ton vs 0,5 lb/ton). En la figura 2.5 se puede apreciar esta diferencia de emisiones:

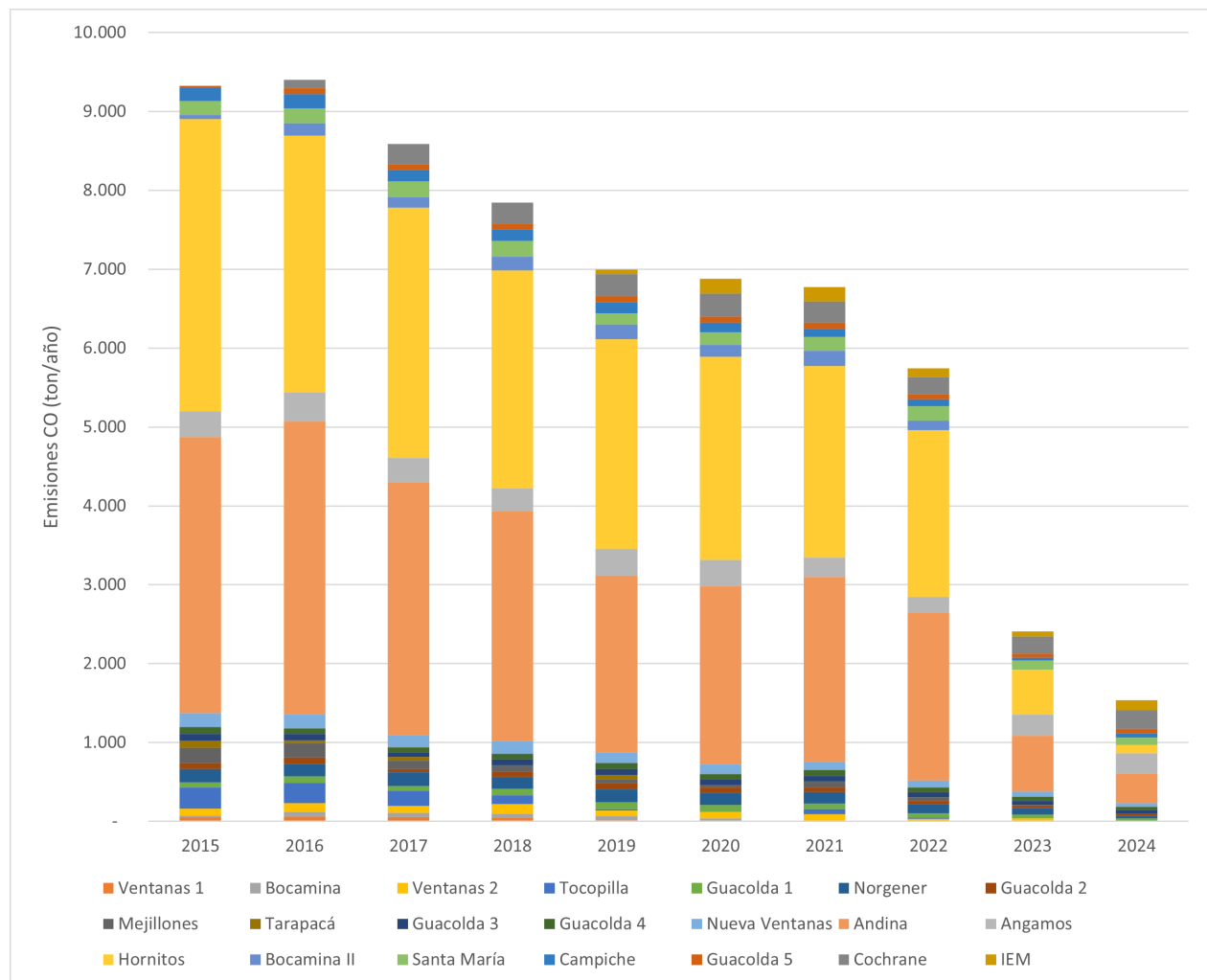


Figura 2.5: Emisión específica de monóxido de carbono por entidad. Elaboración propia.

Si se recalcularan sus emisiones utilizando un factor equivalente al de las otras unidades, los resultados se asemejarían a los reportados por el RETC antes de su cambio metodológico:

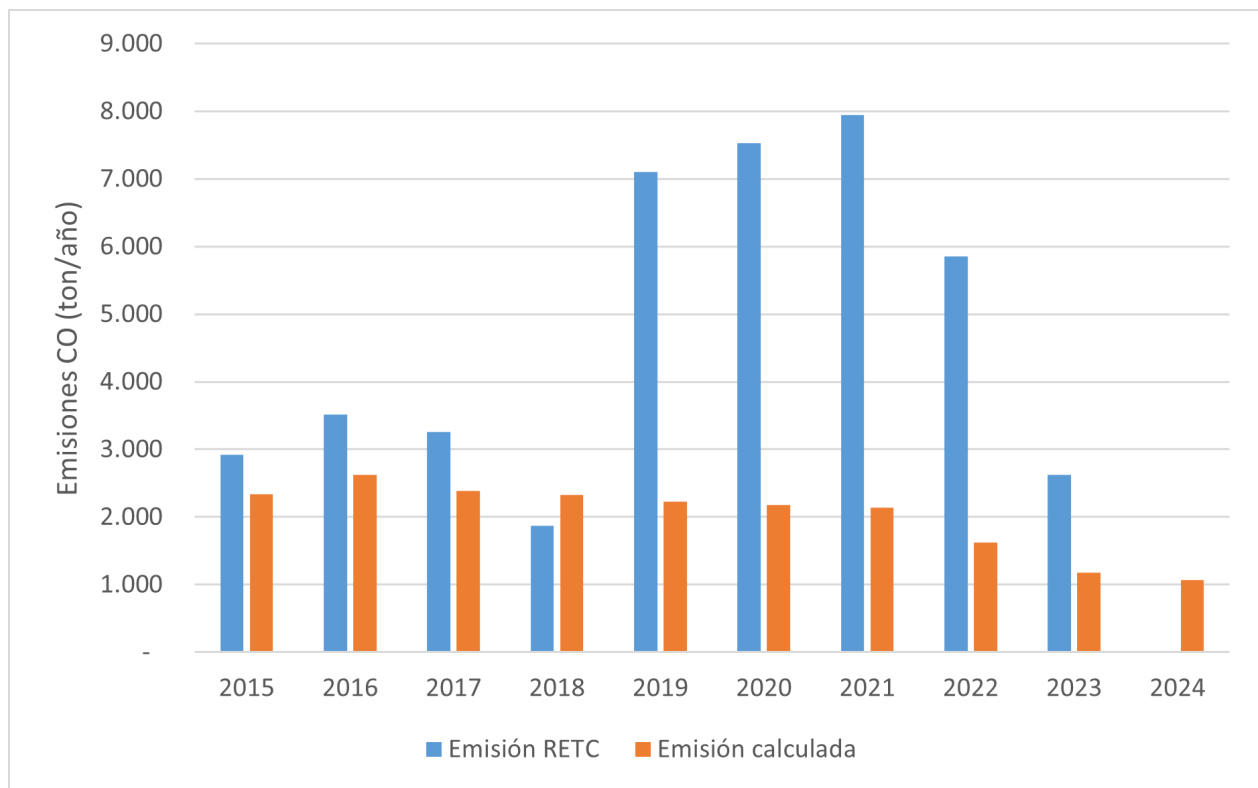


Figura 2.6: Comparación de emisiones de monóxido de carbono obtenidas con datos RETC si el factor de emisión de la central Andina fuera como el resto de unidades. Elaboración propia.

2.2.3. Óxidos de nitrógeno

Los valores estimados de NO_x concuerdan razonablemente con los del RETC. La mayoría de las centrales cuenta actualmente con quemadores low- NO_x .

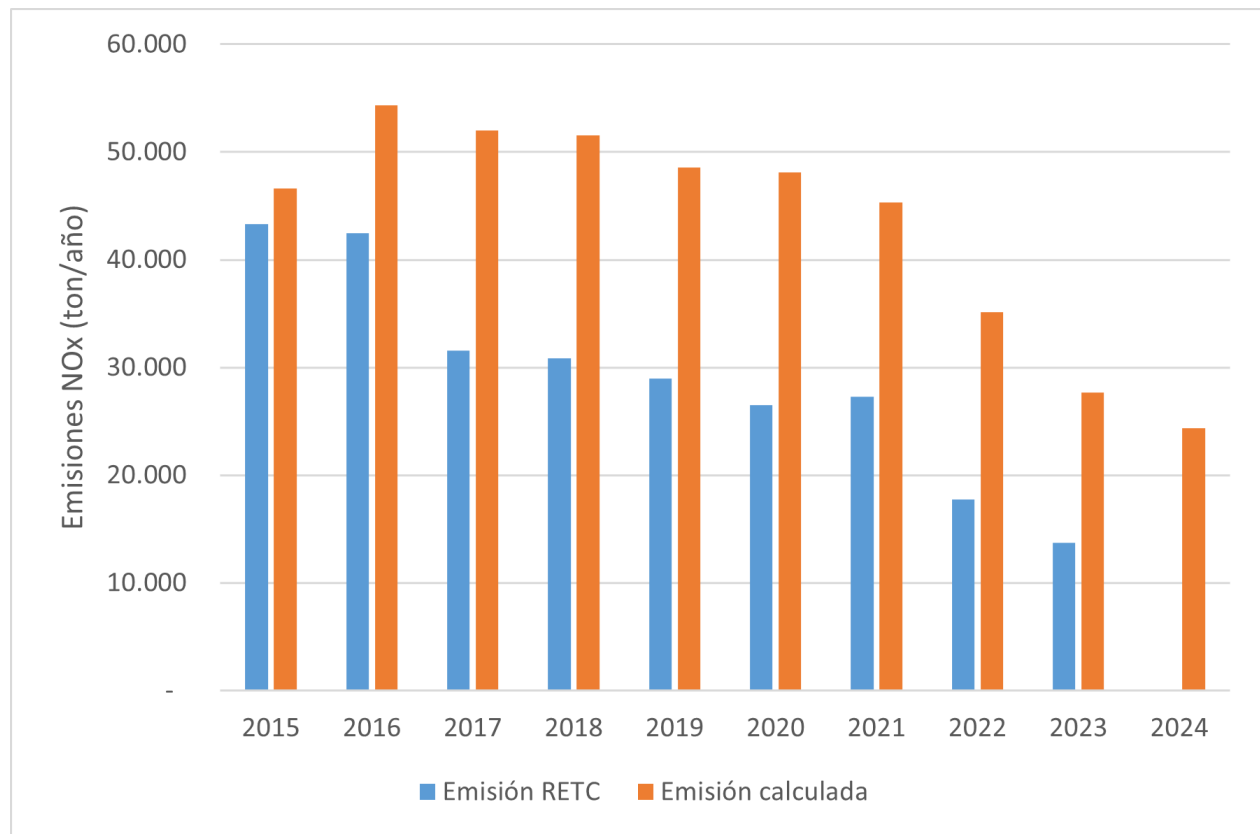


Figura 2.7: Comparación de emisiones de óxidos de nitrógeno obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.

Cabe destacar que la base de datos encontrada para este estudio resulta ser más completa que la proporcionada por el RETC vía transparencia, sin embargo, aún así el RETC cuenta con valores menores.

2.2.4. Dióxidos de azufre

Uno de los casos interesantes presentados en el cálculo de emisiones es el dióxido de azufre, el cuál es bastante menor al reportado por el RETC.

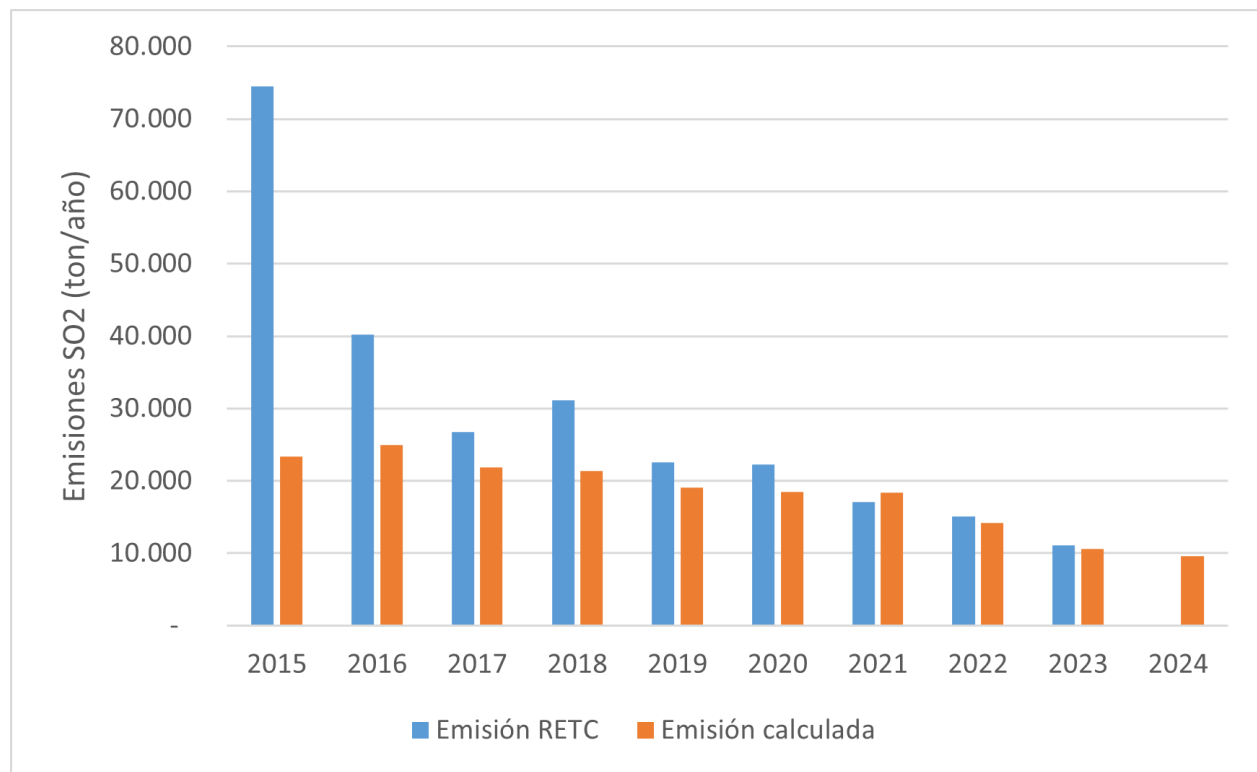


Figura 2.8: Comparación de emisiones de dióxido de azufre obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.

Esto puede deberse principalmente a diferencias en el contenido de azufre del carbón utilizado. De acuerdo con el la CNE, entre 2015 y 2017 el contenido promedio de azufre del carbón importado no superó el 1% para ningún país de origen.

Aún así, persiste una diferencia significativa en 2015 y 2016, lo cuál puede deberse a la incertidumbre respecto al año exacto de instalación de sistemas de abatimiento.

2.2.5. Material particulado respirable

Los resultados de este estudio para MP_{10} son bastante diferentes a los entregados por el RETC, observándose que desde el cambio metodológico realizado en 2019 los valores reportados se aproximan a cero, salvo en 2023, donde casi la totalidad de las emisiones son entregadas por la central termoeléctrica Andina con sus dos unidades, Andina y Hornitos. Además, se obtiene una diferencia significativa en los años anteriores al 2019, esto puede deberse a que los mecanismos de abatimiento, altamente eficientes, no datan desde hace tantos años atrás.

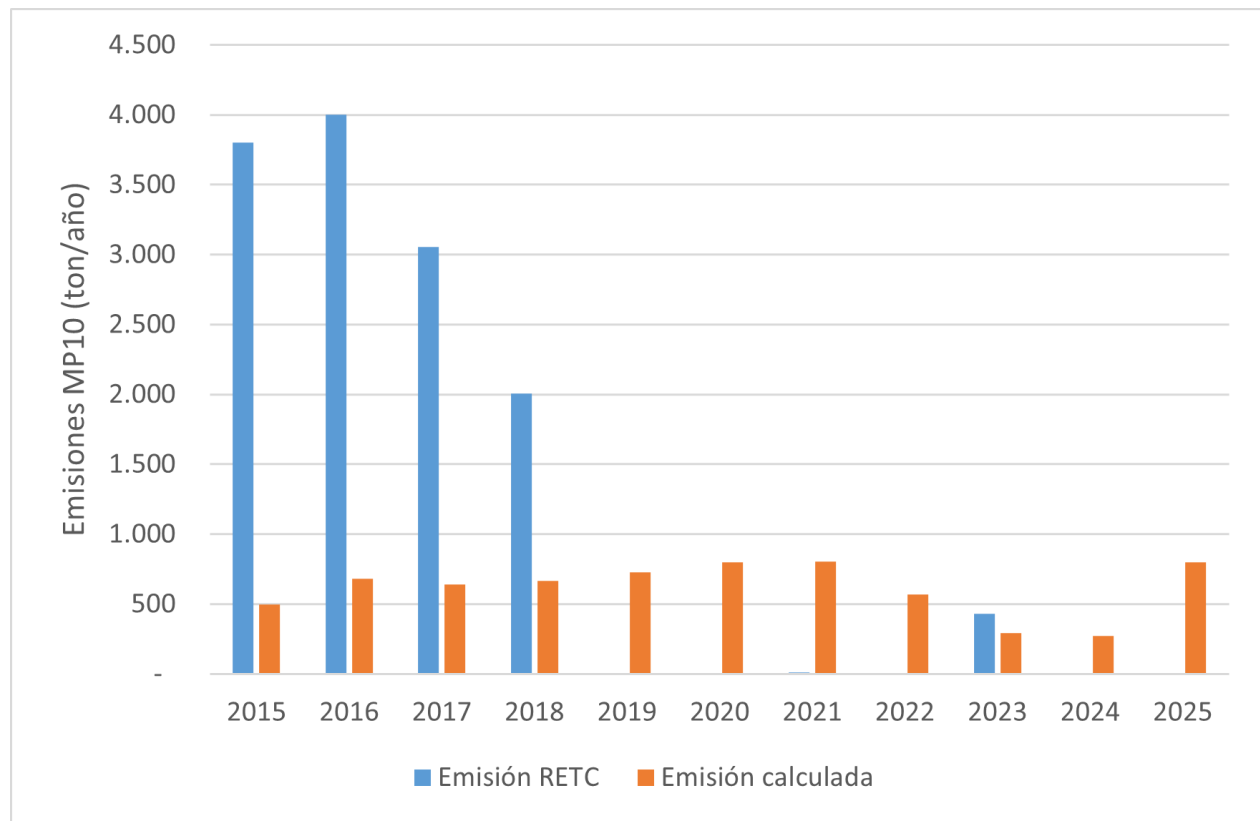


Figura 2.9: Comparación de emisiones de MP_{10} obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.

2.2.6. Material particulado fino

Una tendencia similar se observa con $MP_{2,5}$. Para los años anteriores al 2018 los valores estimados son inferiores al RETC, esto cambia al analizar las emisiones post 2019, sin embargo, la emisión reportada por el RETC corresponde a casi exclusivamente las emisiones de la central andina, mientras las demás son cercanas a cero, no es así con los cálculos obtenidos.

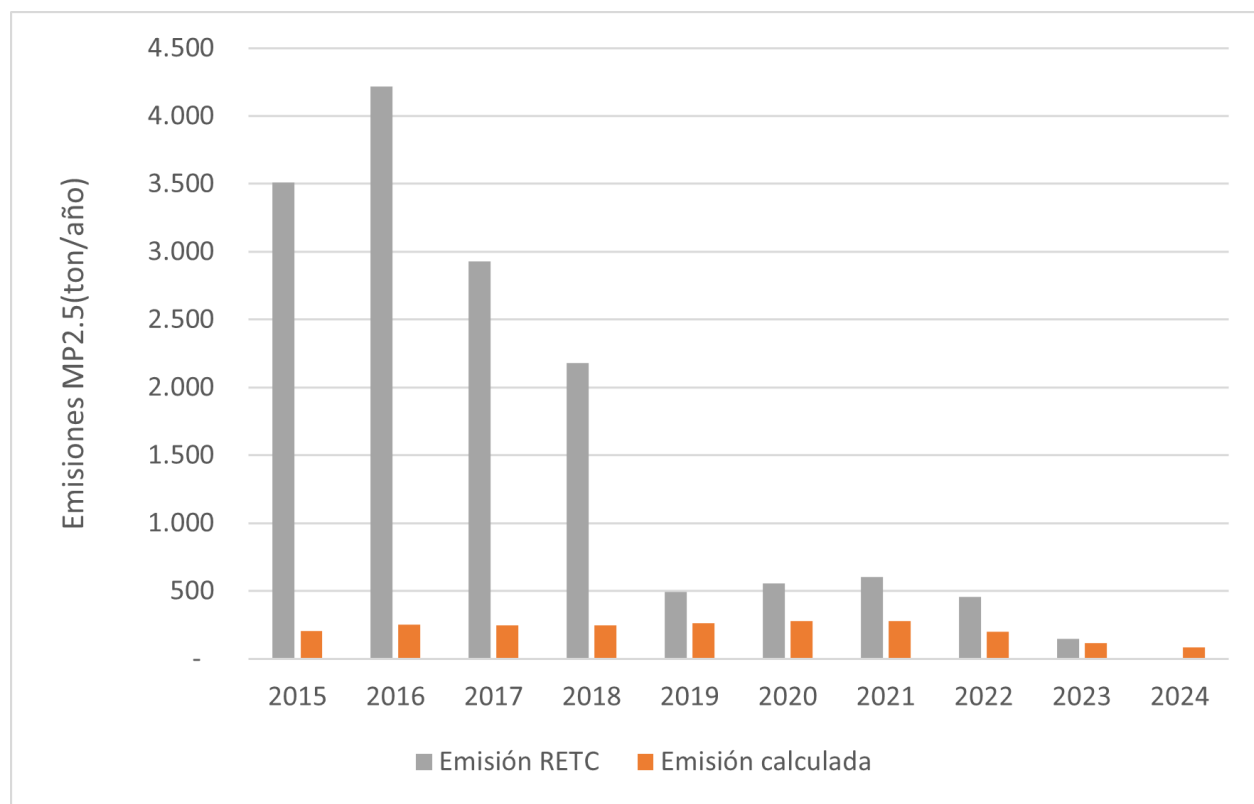


Figura 2.10: Comparación de emisiones de $MP_{2,5}$ obtenidas con datos RETC. Elaboración propia.

2.2.7. Metano

Finalmente, se presentan los resultados de cálculo de la emisión de metano del sector termoeléctrico, contaminante el cuál no es mencionado por el RETC para este sector.

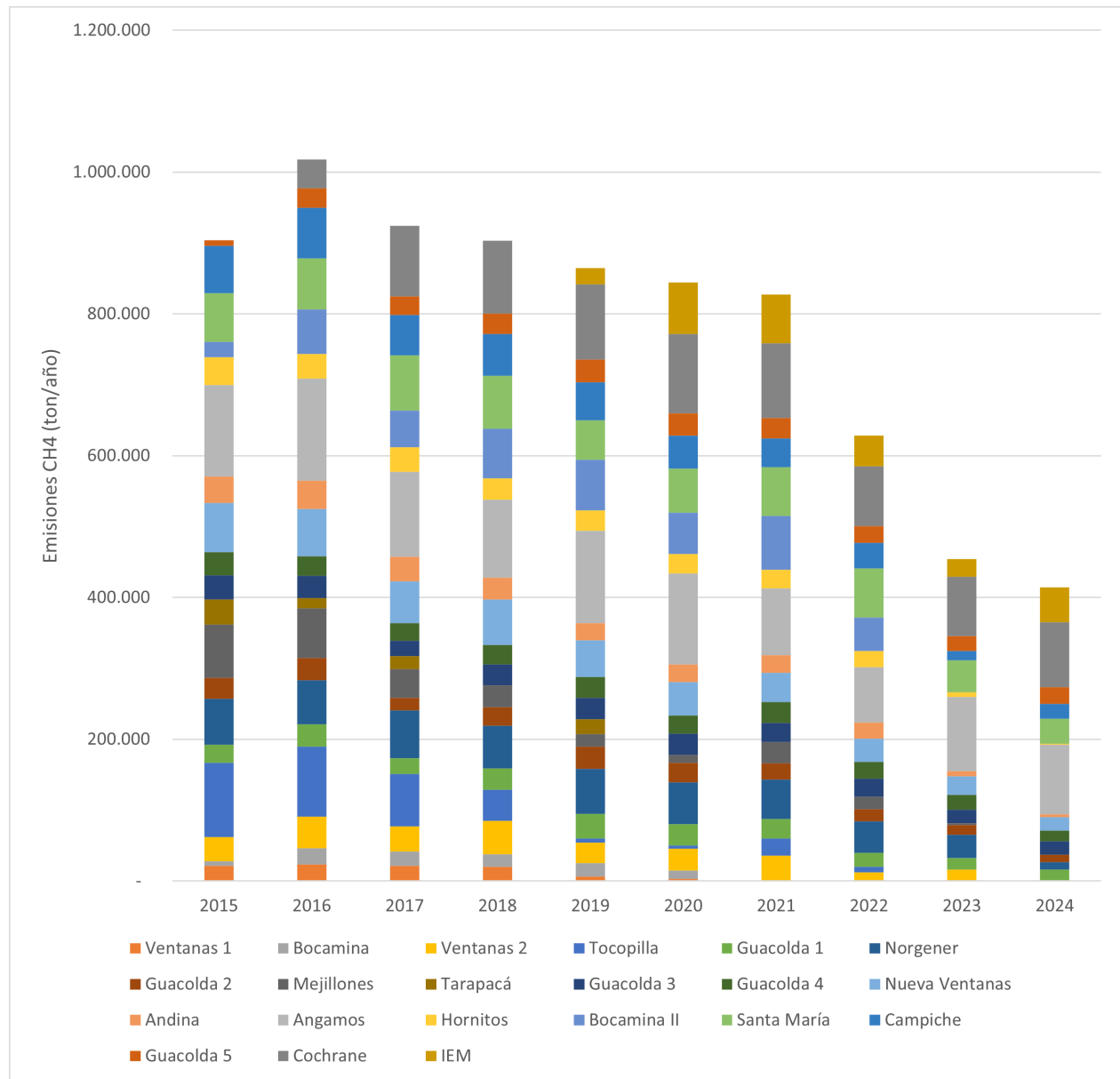


Figura 2.11: Emisión de metano anual por entidad. Elaboración propia.

2.2.8. Resumen de la estimación realizada

Como conclusión, se demuestra que este capítulo ha logrado calcular las emisiones de 7 de los principales contaminantes y gases de efecto invernadero emitidos por el parque termoeléctrico a carbón en Chile, tomando en cuenta efectos como los sistemas de abatimiento, el consumo histórico de carbón y las tecnologías de combustión específicas para cada unidad.

Capítulo 3

Proyección de emisiones

La proyección de emisiones constituye una componente central de este estudio, cuyo objetivo es estimar la magnitud de los contaminantes atmosféricos futuros del parque termoeléctrico chileno bajo distintas trayectorias de descarbonización. Para ello, se han modelado escenarios basados en instrumentos de política pública vigentes, acuerdos empresariales y estudios técnicos sectoriales elaborados en el período reciente.

3.1. Metodología de proyección

Esta sección detalla los procedimientos, supuestos y criterios utilizados para asegurar la reproducibilidad de los resultados y la comparabilidad de las distintas trayectorias.

3.1.1. Generación y definición de escenarios

La construcción de escenarios priorizó la vigencia regulatoria de las medidas consideradas y su relevancia para la planificación nacional, basándose en una revisión bibliográfica de antecedentes normativos, resoluciones de la autoridad energética y compromisos corporativos formalmente disponibles. A continuación, se presentan los fundamentos para cada trayectoria.

Escenario Base o *Business as usual*

Si bien existen múltiples fechas de cierre y reconversión anunciadas en prensa, estas presentan distintos grados de vinculación legal. El Decreto Exento N°50 del Ministerio de Energía formaliza el retiro de unidades específicas de Enel Generación, la central térmica Tocopilla (Engie) y las unidades 1 y 2 de Ventanas (Aes Andes). En el caso de Colbún, la empresa declaró el compromiso de cerrar sus unidades antes de 2040. [Ministerio de Energía, 2020].

No obstante, se identifican discrepancias relevantes. Por ejemplo, la venta de la central Guacolda por parte de AES Andes a Guacolda Energía implica que la nueva propietaria no suscribe los acuerdos incluidos en dicho

decreto. En consecuencia, el escenario base incorpora exclusivamente las medidas formalmente aprobadas por las autoridades competentes, específicamente el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) y la Comisión Nacional de Energía (CNE).

El coordinador eléctrico nacional calificó favorablemente la salida de las unidades 1 y 2 de la central térmica de Mejillones para el 31 de diciembre de 2025, para lo cual tomó en cuenta el cierre de las unidades Andina y Hornitos el 31 de mayo de 2026, y el cese de generación de la central IE Mejillones el 01 de enero para volver el 1 de julio de 2026 reconvertida a gas natural. [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025c].

En términos de acuerdos internacionales, la NDC 2025 establece en su medida de mitigación N°6 que para el 2030 el 80% de la generación eléctrica nacional provendrá de fuentes renovables, proyectándose una matriz sin generación a carbón en 2040. [Gobierno de Chile, 2025].

Escenario "Compromisos al 2040"

Este escenario incorpora, además de las medidas oficiales del escenario base, los compromisos declarados por empresa que aún no han sido formalizados mediante resolución. Entre ellos destaca el plan de Guacolda Energía para implementar co-firing progresivo de amoníaco y carbón, iniciando en 2030 con una sustitución del 30% en las unidades 1 y 2, y ampliando a un 50% para todas las unidades en 2033. [Guacolda Energía SpA, 2025].

Escenario "Cierre al 2035"

También está el caso modelado por la Planificación energética de Largo Plazo PELP 2023-2027, equivalente a "Carbono neutralidad", sin embargo, notar que este escenario toma en cuenta el co-firing como un tipo de generación aparte al carbón. Por lo que se estima una continuación de emisiones, concentradas en la zona de Huasco. [Ministerio de Energía, 2024b].

Escenario "Operación sin carbón al 2030"

Este escenario se basa en un estudio de confiabilidad elaborado por el CEN en 2024 bajo el mismo nombre, el cual analiza generación, costos marginales, requerimientos de inercia y seguridad operativa bajo uno de los escenarios de actualización de la PELP 2022. Dicho estudio concluye que es técnicamente viable eliminar la generación a carbón en condiciones normales de operación sin comprometer la estabilidad del sistema. [Coordinador Eléctrico Nacional, 2024].

En función de lo anterior, se modela la misma trayectoria acelerada de cierre para todas las unidades del parque.

3.1.2. Estimación de operación

Una vez retirada del despacho diario, una unidad puede permanecer hasta cinco años en “Estado de Reserva Estratégica”, en el que puede ser convocada por el coordinador ante eventuales riesgos para la seguridad eléctrica, y si esto ocurre deben permanecer conectadas por el tiempo necesario, con un mínimo de 3 meses. Dado que este mecanismo introduce incertidumbres adicionales, se asume que ninguna unidad en retiro volverá a operar bajo este régimen. [Ministerio de Energía, 2020].

Luego, para todos los escenarios, la línea base corresponde al consumo de carbón reportado para 2024, correspondiente al último año con datos completos disponibles.

Para la estimación de operación se toman varias consideraciones relevantes. En primer lugar, aunque las proyecciones se construyen con datos de 2024, los registros parciales de 2025 muestran consumos iguales o superiores, lo que constituye una fuente de incertidumbre y puede resultar en una estimación conservadora.

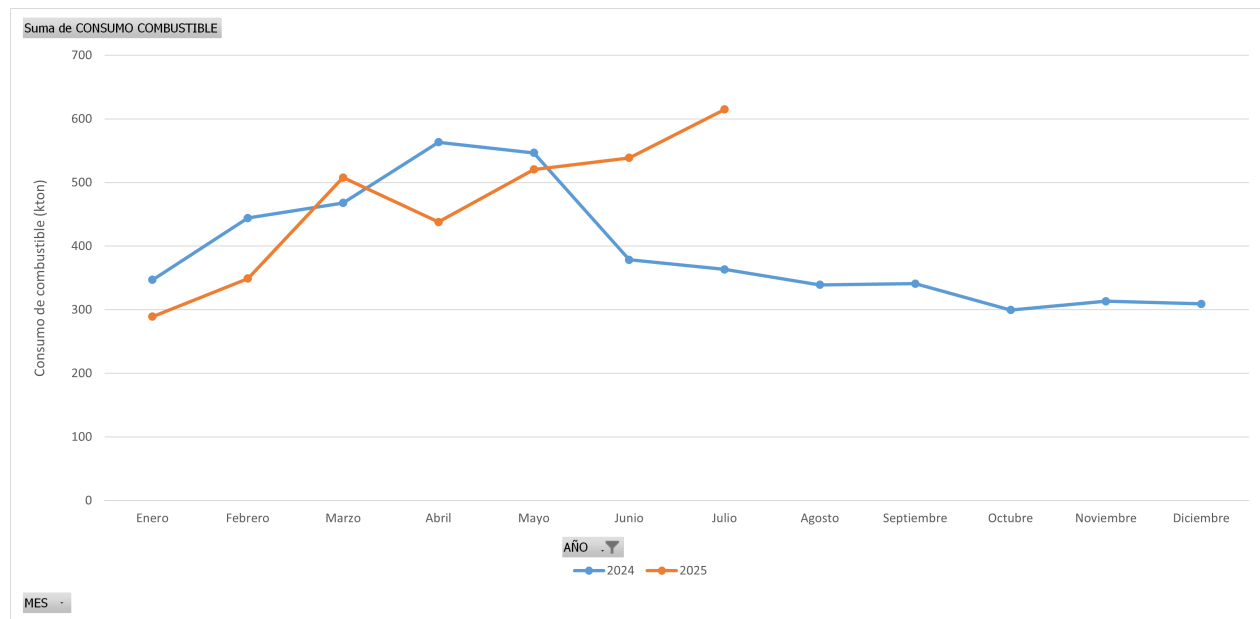


Figura 3.1: Comparación del consumo mensual de carbón del parque termoeléctrico a carbón en Chile entre 2024 y 2025. Elaboración propia.

A analizar un comportamiento histórico mensual, se muestra que el consumo mensual de 2024 muestra un retorno a niveles comparables a los de 2008.

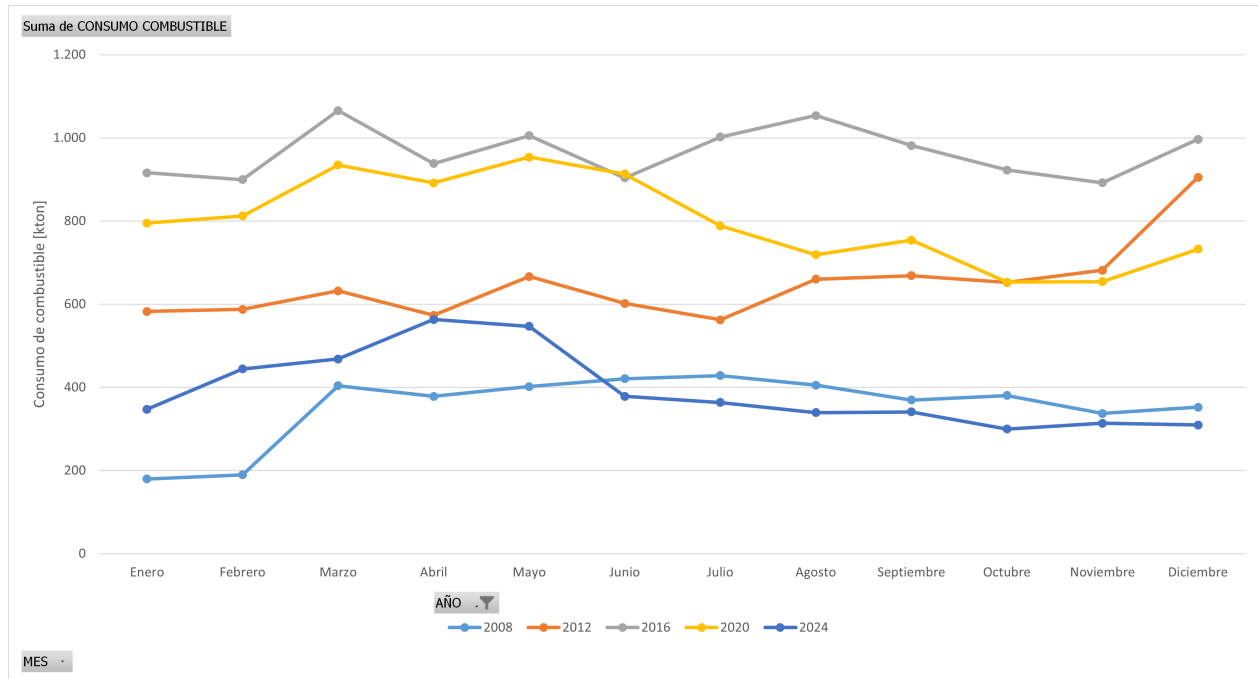


Figura 3.2: Comparación del consumo mensual de carbón del parque termoeléctrico a carbón en Chile en diferentes años. Elaboración propia.

Además, el análisis estacional revela patrones relativamente estables, con máximos suaves entre marzo y julio. Esto último es importante, ya que Andina y Hornitos tienen fecha de cierre para mayo de 2026, y para ellas se asume un comportamiento lineal equivalente al 42% del consumo anual.

3.1.3. Estimación de emisiones en caso Guacolda: co-firing

Para la estimación de emisiones asociadas a la co-combustión de amoníaco (NH_3) y carbón en las unidades de Guacolda, basados en la modelación presentada por [Ahmad et al., 2023] para plantas a carbón de bajo rango, simuladas en ASPEN PLUS.

Para dióxido de carbono y óxidos de azufre, se estima una reducción lineal proporcional a la fracción másica del carbón sustituida. Esto, debido a que la molécula de amoníaco no contiene carbono ni azufre, por lo que su incorporación reduce de manera directa la masa emitida de dichos contaminantes.

En el caso de los óxidos de nitrógeno no continúa la linealidad del comportamiento. Este contaminante depende críticamente del régimen de operación de los ventiladores de la caldera, observándose dos comportamientos diferenciados: Con exceso constante de oxígeno, la mayor temperatura de combustión aumenta la formación de NO_x , mientras que con flujo de aire fijo, la reducción del oxígeno disponible disminuye los NO_x formados.

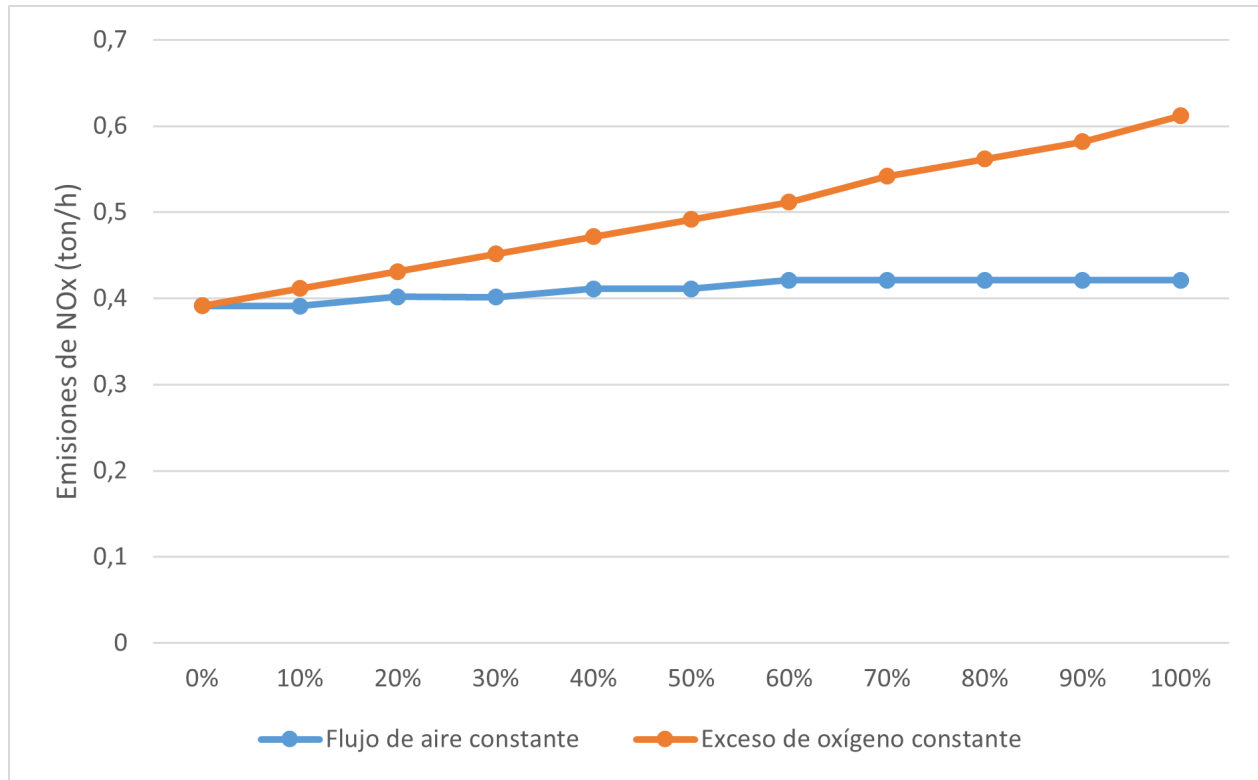


Figura 3.3: Comparación de emisiones de óxidos de nitrógeno en diferentes relaciones másicas de amoníaco. Reelaboración de figura presentada por [Ahmad et al., 2023].

Ambos esquemas mantienen eficiencias térmicas comparables, por lo que se consideran válidos como casos límite para la modelación de emisiones. Los multiplicadores utilizados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Multiplicadores de emisiones de NO_x considerando sustitución másica versus una combustión con 0% amoníaco. Elaboración propia en base a datos presentados por [Ahmad et al., 2023].

Sustitución másica	Exceso de oxígeno constante	Flujo de aire constante
30%	1,154	1,026
50%	1,256	1,051

3.1.4. Escenarios proyectados

A partir de las emisiones estimadas y del comportamiento proyectado del parque, se construyen proyecciones hasta el año 2040 bajo cuatro escenarios. Cada uno refleja supuestos distintos respecto a cierres, conversiones tecnológicas y continuidad operacional.

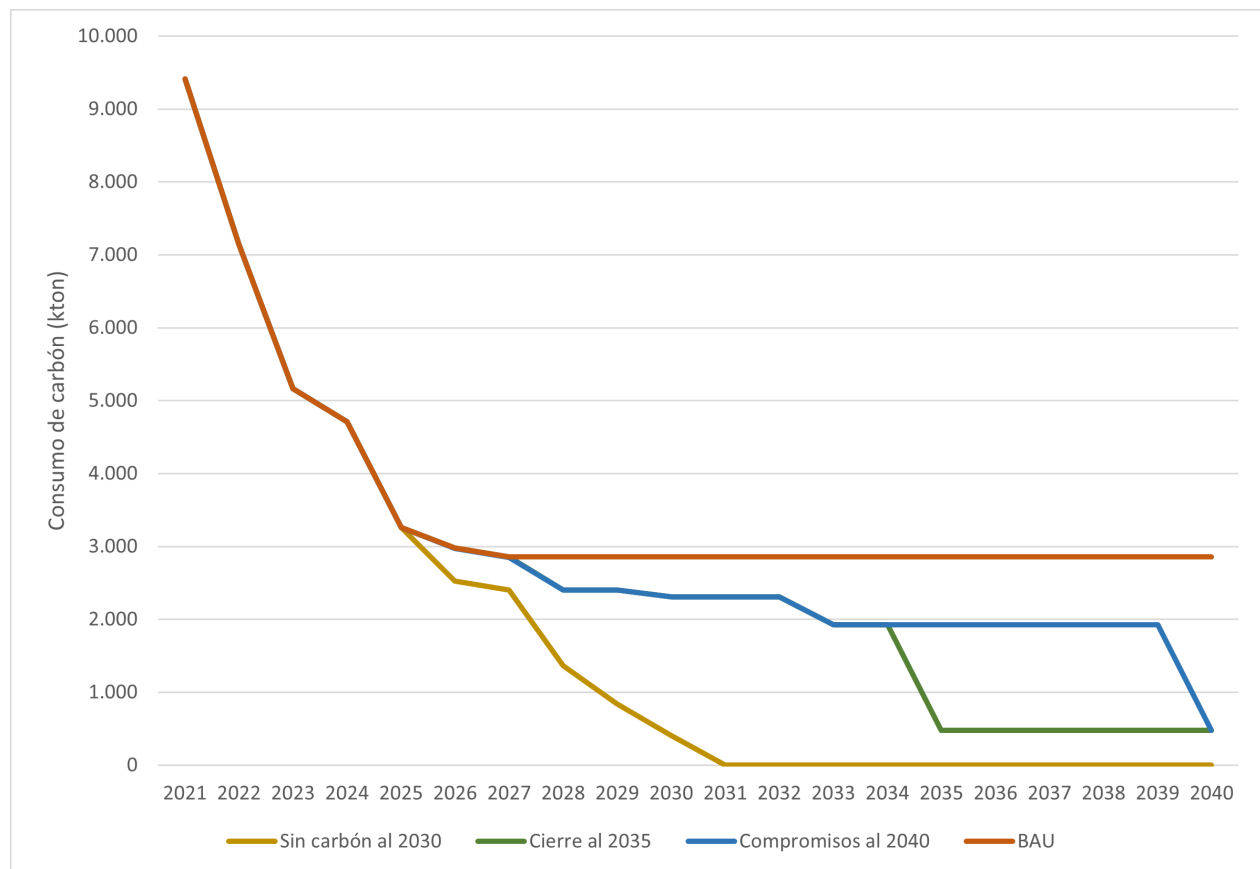


Figura 3.4: Proyección consumo de carbón. Elaboración propia.

3.1.5. Business as usual

En este escenario se incorporan exclusivamente los cierres y reconversiones ya formalmente ejecutados o autorizados mediante resoluciones del Coordinador Eléctrico Nacional. No se incluyen compromisos declarados públicamente, pero sin aviso formal, dado que el proceso regulatorio exige notificación con dos años de anticipación.

Las unidades consideradas en este escenario y sus fechas de cese o reconversión se presentan a continuación:

Tabla 3.2: Consideraciones BAU. Elaboración propia.

Unidad	Detalle	Fechas
Central Térmica Mejillones 1 y 2	Cierre	31 de diciembre de 2025
Angamos 1 y 2	Reconversión a almacenamiento	31 de diciembre de 2025
Infraestructura energética de mejillones	Reconversión a gas natural	31 de diciembre de 2025
Andina	Reconversión a biomasa	31 de mayo de 2026
Hornitos	Reconversión a biomasa	31 de mayo de 2026

El resto de las unidades se modela con operación continua. No se incluyen los compromisos de Nueva Ventanas y Campiche, ya que no han sido presentados al CEN.

3.1.6. Compromisos al 2040

Este escenario incorpora los cierres y reconversiones ya autorizados anteriormente mencionados, sumando la reconversión a co-firing anunciada por Guacolda Energía, y el cierre de Nueva Ventanas y Campiche a fines de 2027, considerando el compromiso público de su propietaria, Quintero Energía, de mantener los acuerdos previos.

Tabla 3.3: Consideraciones escenario compromisos al 2040. Elaboración propia.

Unidad	Detalle	Fechas
Nueva Ventanas y Campiche	Cierre	31 de diciembre de 2027
Guacolda 1 y 2	Co-firing 30% amoníaco	31 de diciembre de 2030
Guacolda 1, 2, 3, 4 y 5	Co-firing 50% amoníaco	31 de diciembre de 2033

El reemplazo del carbón en el co-firing se modela por unidad de masa, dado que los factores de emisión y el aporte energético del amoníaco dependen de la fracción másica reemplazada.

3.1.7. Cierre al 2035

Este escenario se fundamenta en la trayectoria “carbono neutralidad” de la PELP 2023-2027. Se consideran los cierres y reconversiones anteriores, además, se asume que el parque a carbón deja de operar completamente a fines de 2035.

Tabla 3.4: Consideraciones escenario cierre al 2035. Elaboración propia.

Unidad	Detalle	Fechas
Cochrane	Cierre	31 de diciembre de 2035
Santa María	Cierre	31 de diciembre de 2035

3.1.8. Operación sin carbón al 2030

Finalmente, se modela un escenario propuesto en la PELP 2022 estudiado por el CEN en 2024, el cuál considera un escenario de generación sin carbón al 2030. En esta proyección, se considera que todas las centrales anteriormente mencionadas cierran antes de lo programado, según el siguiente cronograma:

Tabla 3.5: Consideraciones escenario operación sin carbón al 2030. Elaboración propia.

Unidad	Detalle	Fechas
Nueva Ventanas y Campiche	Cierre	31 de diciembre de 2025
Cochrane	Cierre	31 de diciembre de 2027
Guacolda 1, 2 y 3	Cierre	31 de diciembre de 2028
Guacolda 4 y 5	Cierre	31 de diciembre de 2029
Santa María	Cierre	31 de diciembre de 2030

3.2. Proyección de emisiones

En general, todos los contaminantes muestran reducciones significativas hacia 2035 y 2040, aunque la magnitud y la rapidez del descenso dependen del escenario evaluado. El contraste entre el BAU y los escenarios “sin carbón al 2030” evidencia la importancia de adelantar la salida del carbón para acelerar la mitigación y reducir impactos en salud y normativa ambiental.

Además, se nota que entre 2021 y 2024, las emisiones muestran una reducción cercana al 50% en todos los escenarios, productos de los cierres ejecutados y la disminución general en consumo.

3.2.1. Emisiones proyectadas de dióxido de carbono

Las emisiones de dióxido de carbono difieren significativamente hacia los escenarios futuros, hacia 2035, en el escenario 2040 se reduce en torno a 80% respecto a 2021. El escenario cierre al 2035, profundiza la baja hasta un 95% con emisiones cercanas a 1,35 MtCO₂. Mientras que el caso sin carbón al 2030 elimina completamente las emisiones desde 2030 en adelante.

Tabla 3.6: Resultados de emisiones proyectadas de dióxido de carbono. Elaboración propia.

Año	BAU	Compromisos al 2040	Cierre al 2035	Sin carbón al 2030
2021	26.511.916	26.511.912	26.511.912	26.511.912
2024	13.275.470	13.275.475	13.275.475	13.275.475
2027	8.037.474	8.027.327	8.037.476	6.765.708
2030	8.037.474	6.508.308	6.508.307	1.143.787
2033	8.037.474	5.416.858	5.416.857	-
2036	8.037.474	5.416.858	1.348.851	-
2039	8.037.474	5.416.858	1.348.851	-
2040	8.037.474	1.348.851	1.348.851	-

3.2.2. Emisiones proyectadas de dióxido de azufre

El dióxido de azufre muestra reducciones abruptas a medida que avanza el cierre del parque a carbón. Por una parte, el escenario de compromisos al 2040 es el más conservador, la disminución de emisiones en 2033 bajan un 78% sin volver a bajar hasta el 2040, estancándose en 412 toneladas y logrando una reducción del 95%. Por otro lado, el escenario de cierre al 2035 converge en ese último 95% de reducción mucho antes. Sin embargo, el escenario sin carbón al 2030 elimina completamente las emisiones de SO₂ desde 2033, evidenciando que el adelanto del cierre evita las emisiones residuales que persisten durante la última fase de operación en los otros cronogramas. Para 2040, el patrón se mantiene: ambos escenarios convencionales conservan un nivel residual estable, mientras que el escenario acelerado alcanza cero emisiones una década antes.

Tabla 3.7: Resultados de emisiones proyectadas de dióxido de azufre. Elaboración propia.

Año	BAU	Compromisos al 2040	Cierre al 2035	Sin carbón al 2030
2021	7514	7514	7514	7514
2024	3973	3973	3973	3973
2027	2459	2459	2456	2070
2030	2459	1992	1992	350
2033	2459	1658	1658	-
2036	2459	1658	413	-
2039	2459	1658	413	-
2040	2459	413	413	-

3.2.3. Emisiones proyectadas de óxidos de nitrógeno

En el caso de los óxidos de nitrógeno, las diferencias entre escenarios se expresan tanto en magnitud como en el contraste entre trayectorias optimistas y pesimistas, debido a la central Guacolda y su cambio a co-firing. Mientras el escenario de compromisos al 2040 reduce las emisiones a un rango cercano a 72–74% menos que en 2021 hacia 2035, el escenario de cierre al 2035 logra disminuciones superiores, cercanas al 87–89%, aunque ambos sin eliminarse, y quedando en su último año sólo la generación con Guacolda. El escenario sin carbón al 2030, en cambio, elimina completamente las emisiones desde 2033.

Tabla 3.8: Resultados de emisiones proyectadas de óxidos de nitrógeno. Elaboración propia

Año	BAU	Compromisos al 2040 optimista	Compromisos al 2040 pesimista	Cierre al 2035 optimista	Cierre al 2035 pesimista	Sin carbón al 2030
2021	932.904	932.904	932.904	932.904	932.904	932.904
2024	467.116	467.116	467.116	467.116	467.116	467.116
2027	282.968	282.611	282.968	282.968	282.968	238.265
2030	282.968	239.049	242.909	239.049	242.909	40.408
2033	282.968	239.049	242.909	239.049	242.909	-
2036	282.968	243.113	261.021	99.918	117.826	-
2039	282.968	243.113	261.021	99.918	117.826	-
2040	282.968	99.918	117.826	99.918	117.826	-

3.2.4. Emisiones proyectadas de material particulado respirable

El MP₁₀ experimenta una caída pronunciada en todos los escenarios, aunque nuevamente destacan las diferencias en el ritmo de reducción. Bajo el escenario de compromisos al 2040, las emisiones disminuyen a cerca de 80% por debajo de 2021 al 2033, alcanzando valores en torno a 470 toneladas. En cambio, el cierre al 2035 baja a 93 toneladas a 2035, lo que representa una reducción de aproximadamente 96%. El escenario sin carbón al 2030 elimina por completo las emisiones desde 2033, adelantando de forma significativa los beneficios en términos de calidad del aire. Para 2040, ambos escenarios de cierre progresivo convergen en valores bajos, mientras que el escenario acelerado mantiene cero emisiones.

Tabla 3.9: Resultados de emisiones proyectadas de material particulado respirable. Elaboración propia.

Año	BAU	Compromisos al 2040	Cierre al 2035	Sin carbón al 2030
2021	2.359	2.359	2.359	2.359
2024	1.232	1.232	1.232	1.232
2027	698	698	697	567
2030	698	542	542	55
2033	698	470	470	-
2036	698	470	97	-
2039	698	470	97	-
2040	698	97	97	-

3.2.5. Emisiones proyectadas de material particulado fino

El material particulado fino presenta la misma proporción que el respirable, debido a que sus sistemas de abatimiento y tecnologías son los mismos. En los compromisos al 2040, las emisiones descienden a 221 toneladas hacia 2033, equivalentes a una reducción de alrededor del 77% respecto a 2021. El escenario de cierre al 2035 reduce las emisiones a aproximadamente 35 toneladas al 2035, logrando una reducción del 97% con respecto al 2021, manteniendo un nivel significativamente mayor que el del cronograma al 2040. Por su parte, el escenario sin carbón al 2030 elimina completamente las emisiones desde 2033, representando un adelanto de cerca de diez años en la eliminación total del contaminante. En 2040, ambos escenarios convencionales convergen nuevamente en niveles reducidos, mientras que el escenario acelerado permanece en cero.

Tabla 3.10: Resultados de emisiones proyectadas de material particulado fino. Elaboración propia.

Año	BAU	Compromisos al 2040	Cierre al 2035	Sin carbón al 2030
2021	969	969	969	969
2024	559	559	559	559
2027	303	303	302	246
2030	303	240	240	14
2033	303	221	221	-
2036	303	221	25	-
2039	303	221	25	-
2040	303	25	25	-

3.2.6. Resumen de proyección de emisiones

En conjunto, las proyecciones evidencian que el ritmo de descarbonización tiene un efecto determinante en la magnitud y oportunidad de las reducciones de emisiones. Mientras los escenarios basados en los compromisos actuales logran reducciones sustantivas desde 2035, ambos continúan con la generación a carbón al permitir el co-firing, sólo el escenario sin carbón al 2030 elimina completamente las emisiones, generando beneficios ambientales y sanitarios acumulados durante todo el período. En todos los contaminantes, este escenario adelanta en aproximadamente diez años la eliminación total, evitando las emisiones residuales que persisten incluso en 2040 bajo los otros cronogramas.

Capítulo 4

Cumplimiento según normativa ambiental y recomendaciones internacionales

En este informe, los datos de emisiones han sido presentados a nivel nacional, permitiendo contextualizar la reducción de emisiones totales del sector energético fósil. Sin embargo, los contaminantes atmosféricos generan impactos directos y diferenciados sobre la salud de la población a escala local. Por ello, una evaluación con enfoque sanitario debe necesariamente desagregarse a nivel comunal, especialmente en el contexto chileno, donde las condiciones geográficas, meteorológicas y demográficas varían significativamente de norte a sur, y donde cada comuna presenta un grado distinto de participación en la generación termoeléctrica a carbón.

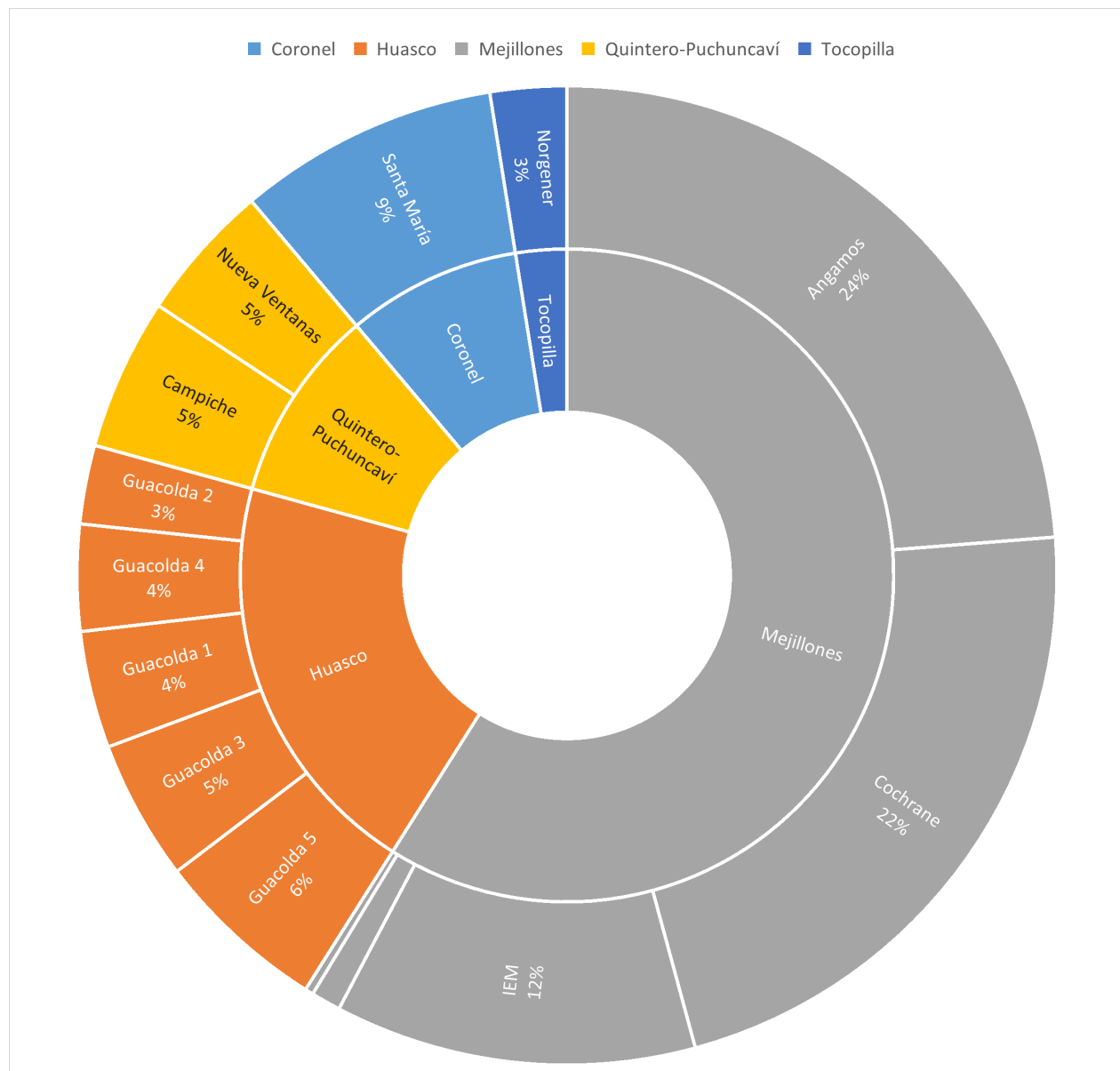


Figura 4.1: Consumo de carbón en 2024 específico por comuna y central generadora. Elaboración propia.

A partir de la Figura 4.1 se observa que la comuna de Mejillones concentra más del 50 % del consumo total de carbón durante el año 2024, destacando la central Cochrane como una de las de mayor participación. Esta central no cuenta actualmente con una fecha definida de cierre o reconversión, lo que plantea interrogantes respecto de su compatibilidad con los compromisos de descarbonización a largo plazo. Asimismo, la central Angamos, pese a haber comprometido su cierre, mantiene niveles de consumo comparables a los de Cochrane, lo que podría comprometer el cumplimiento efectivo de dichos compromisos. Finalmente, la comuna de Huasco se posiciona como la segunda con mayor consumo de carbón a nivel nacional; en este

caso, el compromiso de reconversión a co-firing, en lugar de un cierre definitivo, implica la continuidad del uso de carbón y, por tanto, una presión persistente sobre la calidad del aire local.

El presente capítulo analiza los niveles de emisión reportados por las centrales a carbón en operación mediante tres enfoques complementarios. El primero corresponde a una revisión de la normativa sectorial aplicable por comuna, considerando que la regulación ambiental chilena en cuanto a planes de descontaminación no es homogénea y varía según la condición de saturación o latencia de cada cuenca atmosférica. El análisis se desglosa por zonas geográficas con presencia histórica de centrales termoeléctricas a carbón: Tocopilla, Mejillones, Huasco, Quintero–Puchuncaví y Coronel. En cada caso, se evalúa si las emisiones de Material Particulado (MP), Dióxido de Azufre (SO₂) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x) se mantienen dentro de los umbrales establecidos o si, por el contrario, exceden los límites permitidos, comprometiendo la calidad del aire y la salud de la población circundante.

El segundo enfoque consiste en contrastar los datos de monitoreo continuo de emisiones, validados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), con el marco regulatorio vigente en Chile, particularmente las Normas Primarias de Calidad Ambiental. Este análisis entrega valores explícitos que posteriormente sirven de base para la comparación entre la normativa nacional y las recomendaciones internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Finalmente, como aporte adicional de esta investigación, se presenta una propuesta exploratoria de seguimiento de los efectos del proceso de descarbonización en las comunas carboneras. Para ello, se compara el consumo total de carbón con las atenciones de urgencia registradas en hospitales de tres comunas representativas: Tocopilla, Mejillones y Coronel.

4.1. Normativa ambiental

Chile regula la contaminación atmosférica a través de Normas Primarias de Calidad Ambiental, las cuales establecen concentraciones máximas permitidas de contaminantes con el objetivo de resguardar la salud de la población. De acuerdo con la legislación nacional, una zona se declara en estado de latencia cuando la concentración de un contaminante se sitúa entre el 80 % y el 100 % del valor límite de la norma, y en estado de saturación cuando dicho límite es superado.

A continuación, se presenta un análisis detallado de la situación normativa y del cumplimiento de los estándares de calidad del aire en las principales zonas del país con presencia de centrales termoeléctricas a carbón.

4.1.1. Plan de descontaminación Tocopilla

Según el estudio realizado por DICTUC [Escobar et al., 2006], previo a la implementación del Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA), las centrales termoeléctricas constituían las fuentes dominantes de contaminantes en la zona de Tocopilla. En particular, las unidades de Norgener y Electroandina concentraban el 96 % de las emisiones totales de material particulado respirable (MP₁₀) y el 99,5 % de las emisiones de

dióxido de azufre (SO₂). En el caso de los óxidos de nitrógeno (NO_x), el sector termoeléctrico aportaba aproximadamente un 90 % del total.

En respuesta a esta situación de saturación, en el año 2010 entró en vigor el Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Tocopilla [Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2010]. Este instrumento de gestión ambiental estableció límites estrictos y progresivos de emisión anual para las fuentes termoeléctricas, obligando a reducciones significativas luego de un período de adaptación de tres años y medio.

Tabla 4.1: Límites establecidos por el PDA de Tocopilla para las emisiones de material particulado respirable en toneladas al año. Reelaboración propia en base al decreto correspondiente.

Fuente emisora	Límite inicial [t/año]	Límite final [t/año]
Centro Tocopilla	2002	879
Centro Norgener	1386	469

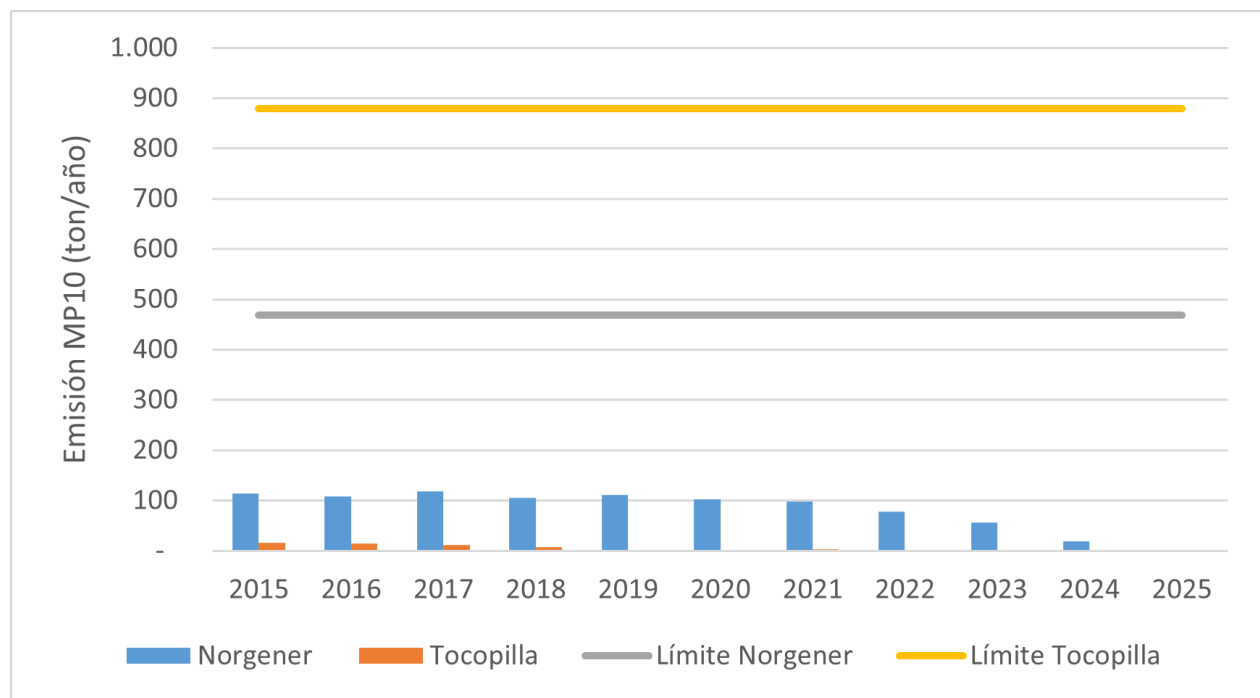


Figura 4.2: Comparación entre emisiones históricas estimadas de material particulado respirable en Tocopilla y los límites establecidos en el PDA. Elaboración propia.

A partir de esta comparación se observa que los límites de emisión establecidos a partir del año 2010 no fueron sobrepasados durante el período analizado. Adicionalmente, se contrastaron los resultados obtenidos mediante factores de emisión con los datos reportados en el último informe de fiscalización ambiental

disponible, correspondiente al año 2024. En dicho informe, la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) reporta emisiones de MP_{10} de 40 t/año para el año 2022, valor inferior al estimado en este estudio mediante factores de emisión, que alcanza las 78 t/año [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023a].

4.1.2. Situación normativa de Mejillones

A diferencia de otras zonas históricamente catalogadas como zonas de sacrificio, Mejillones no cuenta actualmente con un Plan de Descontaminación Atmosférica específico, rigiéndose únicamente por las normas nacionales de calidad del aire. Esto se explica por la ausencia de declaratorias formales de saturación o latencia, asociadas a bajas concentraciones promedio de contaminantes atmosféricos registradas en la zona.

No obstante, esta situación resulta paradójica considerando la alta concentración de infraestructura industrial en la bahía de Mejillones y su condición de principal polo de consumo de carbón del país. Además, la evaluación normativa se centra exclusivamente en concentraciones atmosféricas, sin considerar otros posibles receptores de contaminantes, tales como la acumulación de metales pesados en suelos, la contaminación de aguas subterráneas o la carga sanitaria crónica sobre la población local.

4.1.3. Plan de prevención Huasco

La localidad de Huasco se encuentra sujeta a un Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica [Ministerio del Medio Ambiente, 2017]. El diagnóstico base del plan identificó claramente a los responsables de las emisiones de material particulado, dividiendo la carga principalmente entre la minería y la generación eléctrica.

Tabla 4.2: Responsabilidad de emisiones de material particulado en procesos de combustión según fuente en Huasco. Reelaborado en base a datos entregados por el plan de prevención de Huasco.

Actividad / Fuente emisora	Emisiones base (t/año)	Aporte total (%)
Planta de pellets de CAP Minería	1441	61%
Central termoeléctrica Guacolda de AES Gener	921	39%
Total	2362	100%

El decreto estableció límites máximos de emisión para el complejo Guacolda, fijando un tope de 730 toneladas al año a partir del cuarto año de vigencia del plan.

Tabla 4.3: Emisiones máximas permitidas de MP para el Complejo Termoeléctrico Guacolda. Reelaborado en base a plan de prevención de Huasco.

Plazo para el cumplimiento	Límite máximo (t/año)
Desde el primer año calendario siguiente a la entrada en vigencia del plan	730
Desde el cuarto año calendario siguiente a la entrada en vigencia del siguiente plan	730

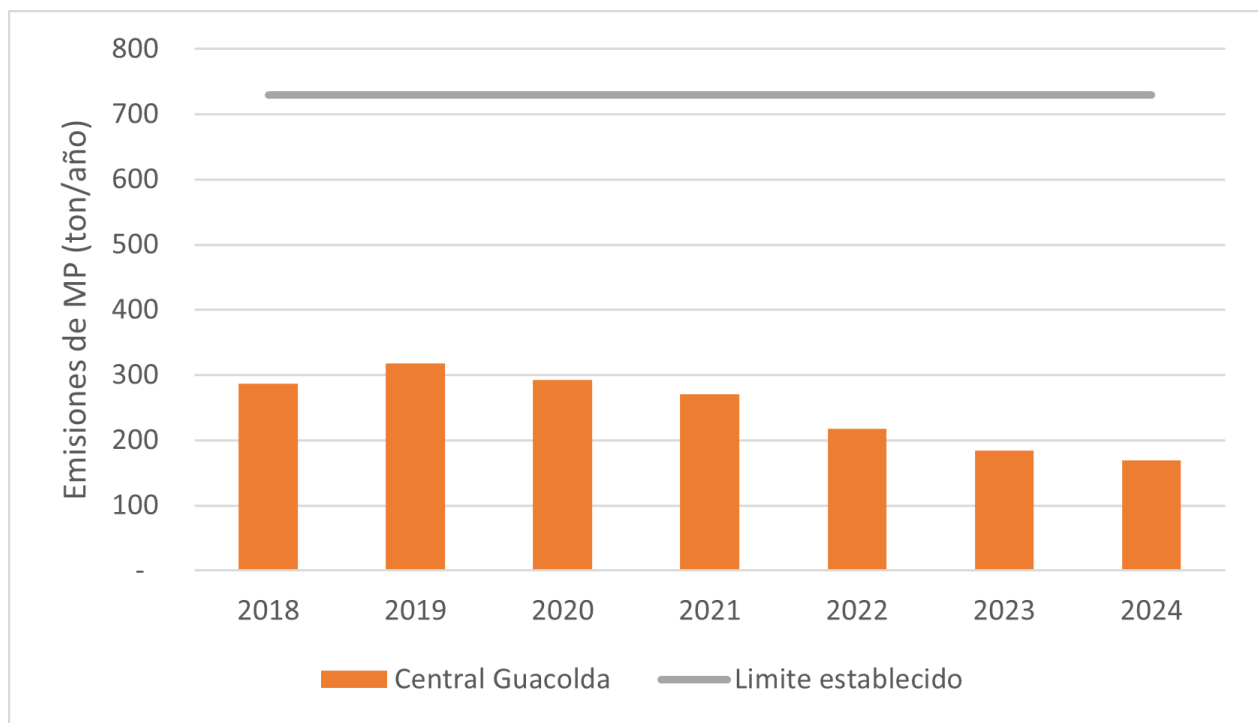


Figura 4.3: Comparación de emisiones históricas calculadas de material particulado en Huasco versus límites establecidos en el plan de prevención de Huasco.

En el caso de Huasco, se observa que los límites establecidos por el plan no son sobrepasados durante el período analizado. Adicionalmente, se compararon los valores obtenidos mediante factores de emisión con los datos reportados por la central en la última fiscalización ambiental disponible, correspondiente al año 2023. En dicho informe, la SMA reporta emisiones de material particulado de 100 t/año, mientras que el valor estimado en este estudio asciende a 184 t/año [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024a].

4.1.4. Plan de descontaminación Concón, Quintero y Puchuncaví

La zona de Concón, Quintero y Puchuncaví se encuentra regulada por el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) del año 2018, correspondiente a uno de los complejos industriales más densos del país. El inventario de emisiones base (2015–2017) identificó a Codelco Ventanas y a AES Gener como los principales responsables de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) [Ministerio del Medio Ambiente, 2019c].

Tabla 4.4: Responsabilidad de emisiones de fuentes puntuales en toneladas al año para diferentes contaminantes en la zona de Concón, Quintero y Puchuncaví. Extracto de tabla reelaborado a partir de plan de descontaminación de la zona mencionada.

Fuente	MP	SO₂	NO_x
AES Gener*	195	6253	7770
Codelco división ventanas	211	12852	7770
ENAP	918	1492	1169
Otras puntuales (D.S. 138)	255	178	977
Sub total	1579	2775	10013

*Emisiones reales promedio 2015-2017.

Tabla 4.5: Emisiones máximas permitidas para el Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES GENER. Reelaborado a partir de plan de descontaminación de la zona Concón, Quintero y Puchuncaví.

Emisiones máximas permitidas	MP	SO₂	NO_x
Antes de la publicación del presente decreto	844	8877	11096
Desde la publicación del presente decreto	212	5579	7523
En el plazo de 3 años contado desde la publicación del presente decreto	212	5326	7523

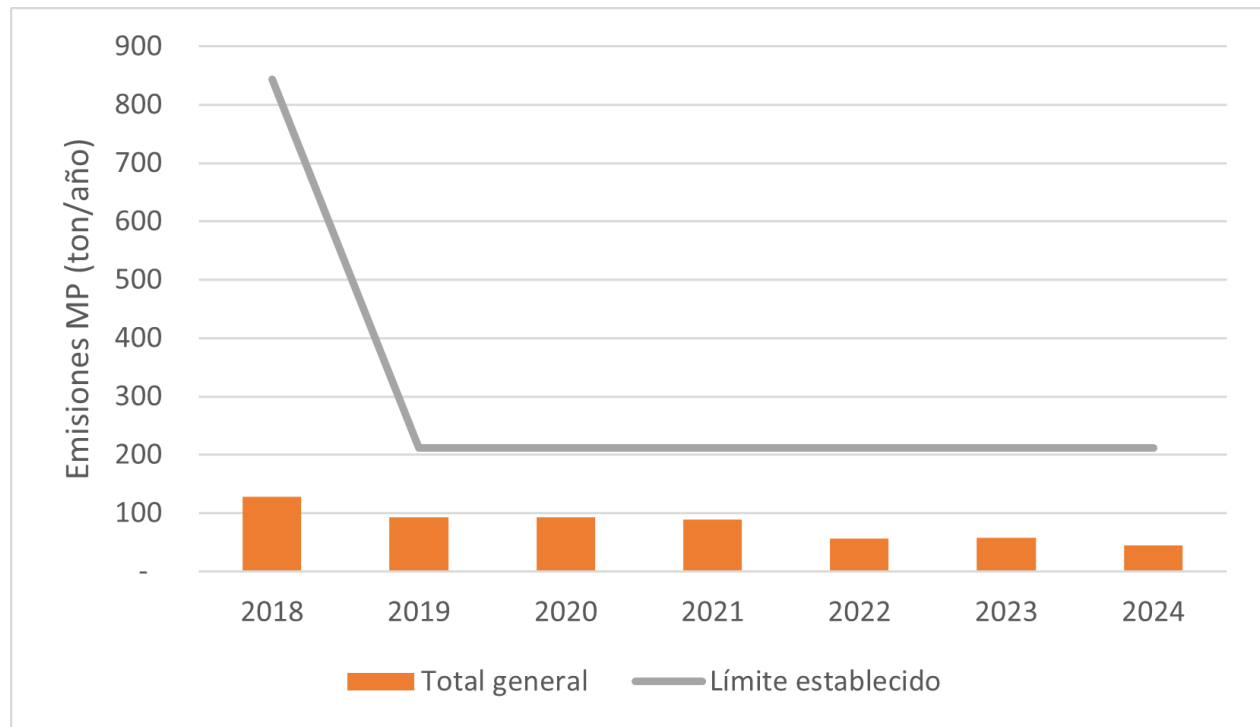


Figura 4.4: Comparación de emisiones históricas calculadas de material particulado en Concón - Quintero - Puchuncaví versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.

Al comparar los valores estimados con el último informe de fiscalización ambiental disponible del plan de descontaminación, se observa que la central Ventanas reportó emisiones de material particulado de 51 t/año en 2022, mientras que el valor calculado en este estudio alcanza las 56 t/año, mostrando una concordancia razonable entre ambas aproximaciones.

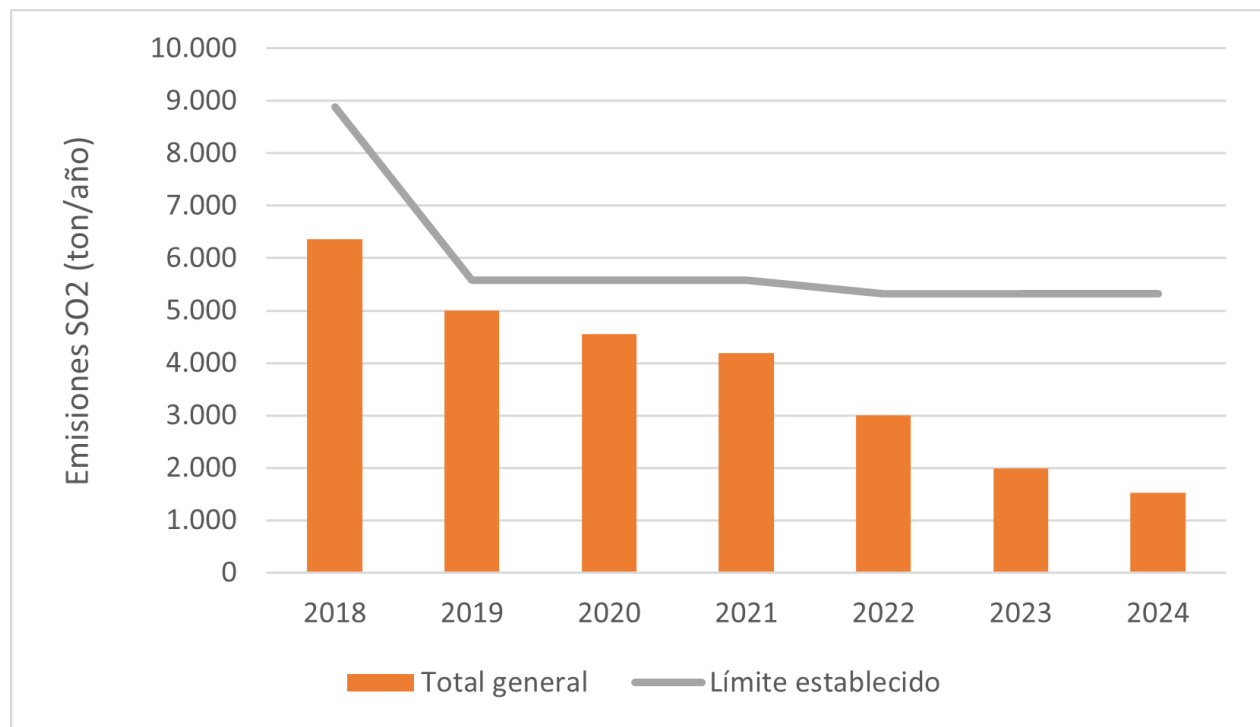


Figura 4.5: Comparación de emisiones históricas calculadas de dióxido de azufre en Concón - Quintero - Puchuncaví versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.

En el caso del dióxido de azufre, se aprecia que la central Ventanas logró adaptarse a los límites establecidos por el plan, particularmente considerando el cierre de las unidades Ventanas 1 y Ventanas 2. Como verificación adicional, se utilizó un informe de fiscalización ambiental, donde la central reporta emisiones de 2.688 t/año, mientras que el valor calculado en este estudio corresponde a aproximadamente 3.000 t/año.

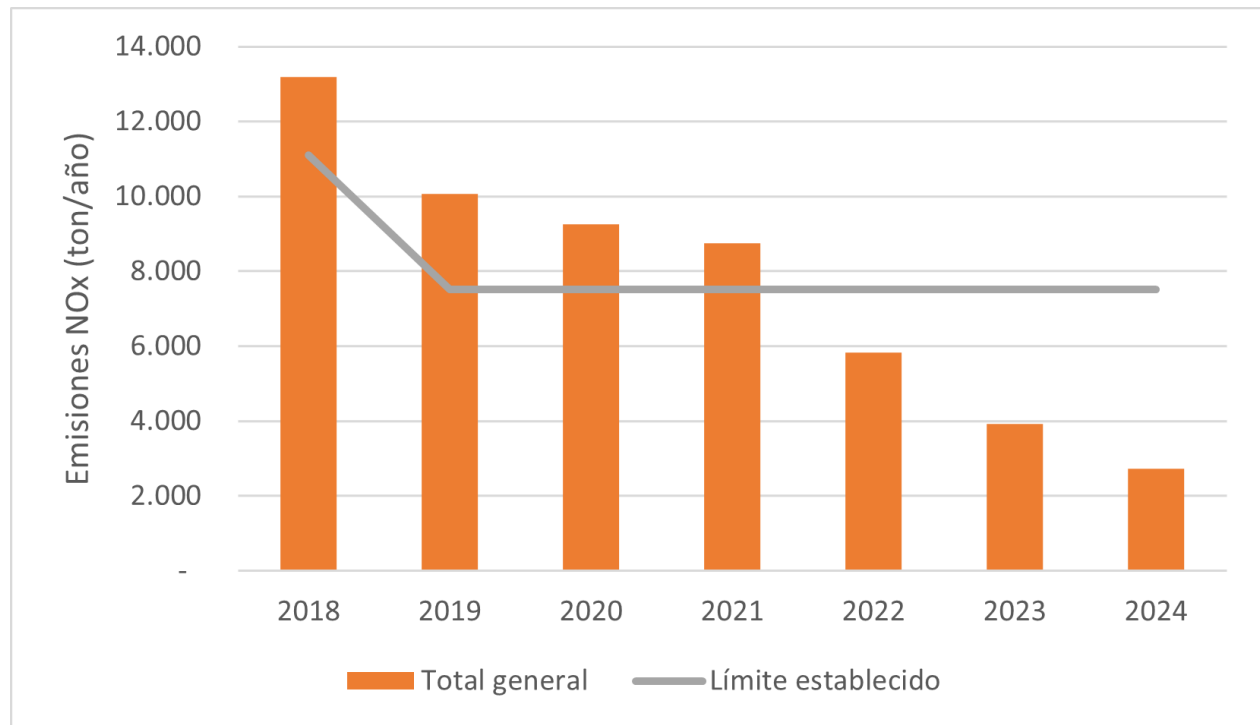


Figura 4.6: Comparación de emisiones históricas calculadas de óxidos de nitrógeno en Concón - Quintero - Puchuncaví versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.

Para los óxidos de nitrógeno, se observa una diferencia significativa entre los valores estimados para la central Campiche y los reportados en la fiscalización ambiental del plan de descontaminación. En particular, la fiscalización declara emisiones de 2.737 t/año, mientras que el cálculo realizado en este estudio alcanza aproximadamente 5.800 t/año. Esta discrepancia se explica principalmente por los supuestos de eficiencia de abatimiento considerados en los sistemas de control de NO_x , los cuales no superan el 50 % de remoción según los antecedentes disponibles [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023c].

4.1.5. Plan de descontaminación Zona Coronel

La zona de Coronel se rige por el Decreto Supremo N.º 6 (2019), cuyo objetivo principal es la reducción del material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$), reconocido como el contaminante atmosférico de mayor impacto sobre la salud humana. El plan define como “Gran Establecimiento” a aquellas fuentes que emiten más de 20 t/año de material particulado o más de 300 t/año de SO_2 , obligándolas a reducir sus emisiones en un 30 % en un plazo máximo de cinco años [Ministerio del Medio Ambiente, 2019d].

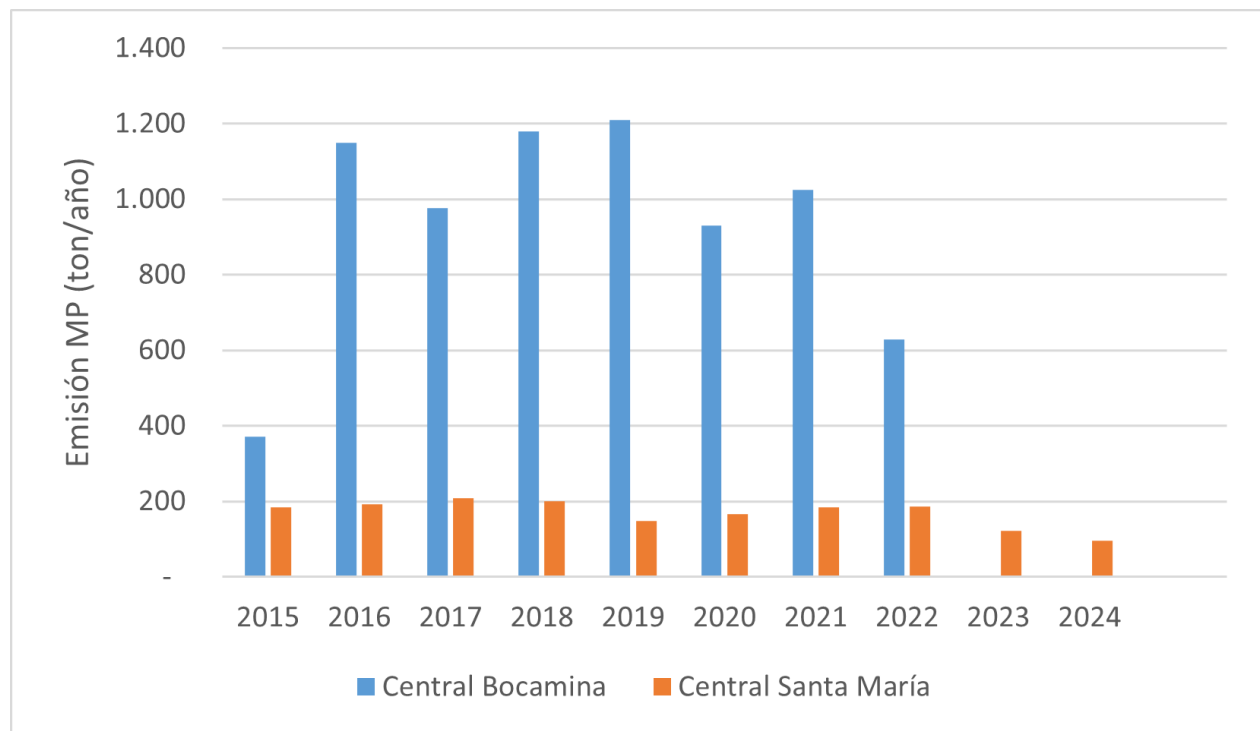


Figura 4.7: Comparación de emisiones históricas calculadas de material particulado en Coronel versus límites establecidos en el plan de descontaminación. Elaboración propia.

En el caso de la central Santa María, los valores reportados en el último informe de fiscalización ambiental disponible corresponden a 69 t/año de material particulado para el año 2024 [Superintendencia del Medio Ambiente, 2025]. Por su parte, el valor estimado en este estudio alcanza las 96 t/año. No obstante, ambos valores se mantienen por debajo del umbral de 100 t/año establecido por el plan, indicando cumplimiento de la normativa vigente.

4.2. Estado de calidad de aire de las comunas de interés según normativa nacional

Con el objetivo de proteger la salud de la población, tanto la normativa nacional como los estándares internacionales establecen niveles máximos de concentración de contaminantes atmosféricos, comúnmente denominados estándares de calidad del aire. En Chile, estos límites se definen a través de las Normas Primarias de Calidad Ambiental, denominadas de este modo debido a su enfoque explícito en la protección de la salud humana. En contraste, las Normas Secundarias de Calidad Ambiental tienen por finalidad la protección de los ecosistemas y del medio ambiente en general.

A continuación, se presenta una revisión del estado de cumplimiento de las normas primarias de calidad del aire en las principales comunas con presencia de centrales termoeléctricas a carbón, utilizando infor-

mación proveniente de estaciones de monitoreo representativas y de los informes técnicos oficiales de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

4.2.1. Tocopilla

En 2024 el informe técnico de cumplimiento de norma de calidad de aire por MP_{10} [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024b] realizó una revisión en el punto de medición más cercano a las centrales, la estación Gobernación, los valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.6: Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma en Coronel. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024b].

Contaminante	Norma 24 horas (percentil 98 2023)	Norma anual (promedio trianual)
MP_{10}	58%	76%

Si bien la zona cumple normativamente, el valor anual del 76% indica que Tocopilla se encuentra en un margen estrecho, rozando el estado de latencia (80%). Esto sugiere que, a pesar de la salida de unidades y los filtros instalados, la carga ambiental basal sigue siendo considerable, es de esperar que con el reciente cese de generación de la Central Norgener, los siguientes valores obtenidos logren alejarse de la zona de latencia.

4.2.2. Mejillones

El análisis de los datos de cumplimiento normativo para el período 2021–2023, correspondientes a la estación Compañía de Bomberos, muestra niveles de concentración que, a primera vista, se encuentran considerablemente por debajo de los límites establecidos por la normativa nacional [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024d].

Tabla 4.7: Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma entre 2021-2023 en Mejillones. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024d].

Contaminante	Norma 1 hora (percentil 99 trianual)	Norma 8 horas (percentil 99 trianual)	Norma 24 horas (percentil 98 2023)	Norma anual (promedio trianual)
MP_{10}	-	-	28%	38%
NO_2	11%	-	-	6%
CO	3%	8%	-	-

Los resultados evidencian que ninguno de los contaminantes analizados se aproxima a la condición de la-

tencia. Sin embargo, este cumplimiento no implica necesariamente bajas emisiones reales, sino que podría explicarse por las condiciones meteorológicas locales. En particular, la bahía de Mejillones presenta un sistema de ventilación natural altamente eficiente, que favorece la dispersión de contaminantes hacia el océano o zonas despobladas, evitando su acumulación en los puntos de monitoreo urbano.

Este fenómeno puede enmascarar la carga real de emisiones generada por el parque termoeléctrico, dejando a la zona en una situación de vulnerabilidad normativa frente a eventuales cambios en las condiciones de ventilación atmosférica o incrementos en los niveles de producción. Esta situación resulta especialmente relevante considerando que, durante el año 2024, la comuna de Mejillones concentró más del 50 % del consumo total de carbón destinado a la generación eléctrica en el país.

4.2.3. Huasco

Las mediciones realizadas en la estación Huasco II indican cumplimiento de la norma de calidad del aire para MP_{10} , aunque con márgenes de seguridad variables [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024c]. Para el material particulado fino ($MP_{2,5}$), se utilizaron los datos provenientes de la estación Huasco (Sivica).

Tabla 4.8: Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma entre 2021-2023 en Huasco. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024c].

Contaminante	Estación	Norma 1 hora (promedio trianual percentil 99)	Norma 8 horas	Norma 24 horas (percentil 98 2023)	Norma anual
MP_{10}	Huasco II	-	-	78%	58%
NO_2	EME-F	17%	-	-	20%
Plomo	Huasco II	-	-	-	0,4%
$MP_{2,5}$	Sivica	-	-	36%	40%

De lo que se puede apreciar es que el plan ha sido efectivo en controlar el dióxido de nitrógeno, sin embargo, en cuanto a material particulado, tener valores del 78% en la norma 24 constituye una señal de alerta.

4.2.4. Concón-Quintero-Puchuncaví

Para esta zona se seleccionaron los datos correspondientes a la estación Quintero, debido a su representatividad poblacional, su cercanía a las principales fuentes de emisión y a que presenta valores levemente superiores a los registrados en la estación La Greda, también próxima a las fuentes emisoras.

A pesar de las exigencias establecidas en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica, la calidad del aire en la zona continúa siendo comprometida, particularmente en lo que respecta al material particulado.

En efecto, los valores anuales de MP_{10} se mantienen dentro del rango de latencia, mientras que el $MP_{2,5}$ se encuentra a solo un 5 % de alcanzar dicha condición, según los datos reportados por la SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024e].

Tabla 4.9: Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma entre 2021-2023 en Concón - Quintero - Puchuncaví. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024e].

Contaminante	Norma 1 hora (2023 percentil 99)	Norma 8 horas	Norma 24 horas (2023)	Norma anual (promedio trianual)
$MP_{2,5}$	-	-	64%	75%
MP_{10}	-	-	62%	80%
SO_2	12%	-	43%*	25%
Plomo	-	-	-	2,2%**

*Corresponde al promedio trianual, 2021-2023.

**Corresponde al promedio bianual, 2022-2023.

4.2.5. Coronel

Para la comuna de Coronel se utilizaron los datos correspondientes a la estación Cerro Merquín. De todas las zonas analizadas, Coronel presenta la situación más crítica en relación con el material particulado fino ($MP_{2,5}$) [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023b].

Tabla 4.10: Valores porcentuales respecto al máximo permitido por norma en Coronel. Reelaborado en base a informe técnico del SMA [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023b].

Contaminante	Norma 24 horas (2022)	Norma anual (promedio trianual)
$MP_{2,5}$	80%	85%
MP_{10}	48%	68%

La persistencia de niveles de latencia en $MP_{2,5}$ indica que las medidas actuales, incluida la reducción del 30% para grandes emisores, podrían ser insuficientes. Existe una necesidad técnica de aumentar la exigencia de control para las industrias circundantes, dado que el margen para alcanzar la saturación es mínimo.

4.3. Comparación de concentraciones registradas con normativa nacional y recomendaciones internacionales

A nivel internacional, diversos países tienen sus propios límites máximos, y la organización mundial de la salud, presenta de forma continua directrices recomendadas a la calidad de aire. Siendo sus últimas actualizaciones las realizadas en 2005 y 2021.

Las directrices de la OMS proponen distintos niveles u “objetivos intermedios” de calidad del aire, recomendando que su adopción sea gradual y acorde a las capacidades técnicas y económicas de cada país. En la actualización de 2021, la OMS concluyó que, a nivel global, se ha observado una mejora general en la calidad del aire, junto con una mayor evidencia científica sobre los impactos sanitarios de la contaminación atmosférica. En consecuencia, los valores recomendados fueron significativamente reducidos respecto de los establecidos en 2005, siendo estos los utilizados en la presente comparación [World Health Organization, 2021].

En Chile, las Normas Primarias de Calidad del Aire deben actualizarse cada cinco años; sin embargo, este proceso no se ha cumplido sistemáticamente. Existen casos como el del material particulado fino ($MP_{2,5}$), cuya normativa vigente ha permanecido sin actualización por más de 14 años, por lo cual, resulta esperable que un aumento en la ambición regulatoria guarde proporción con el tiempo transcurrido entre actualizaciones, lo cual no se observa de forma consistente en la normativa nacional.

A continuación, se presenta una comparación de las mediciones realizadas en las distintas comunas del país mediante las estaciones de monitoreo pertenecientes al SINCA, con los valores establecidos en la normativa chilena vigente y aquellos recomendados por la OMS, ordenados de menor a mayor ambición. En términos generales, se observa que los estándares nacionales se sitúan por debajo del primer objetivo intermedio recomendado por la OMS, destacando únicamente el anteproyecto de norma para material particulado fino, que logra aproximarse a los niveles correspondientes al tercer objetivo intermedio.

4.3.1. Óxidos de nitrógeno

Tabla 4.11: Valores de calidad del aire para NO₂ en µg/m³ según normativa nacional y directrices de la OMS.

NO ₂	1 hora	24 horas	Anual
Norma anterior (2003)*	400	-	100
OMS IT1	200	120	40
Norma vigente (2023)**	200	100	40
OMS IT2	200	50	30
OMS IT3	200	-	20

* [Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2003]

** [Ministerio del Medio Ambiente, 2023a]

A continuación, se presentan las comparaciones de los valores normativos con la situación medida por las estaciones de monitoreo consideradas como representativas en este estudio.

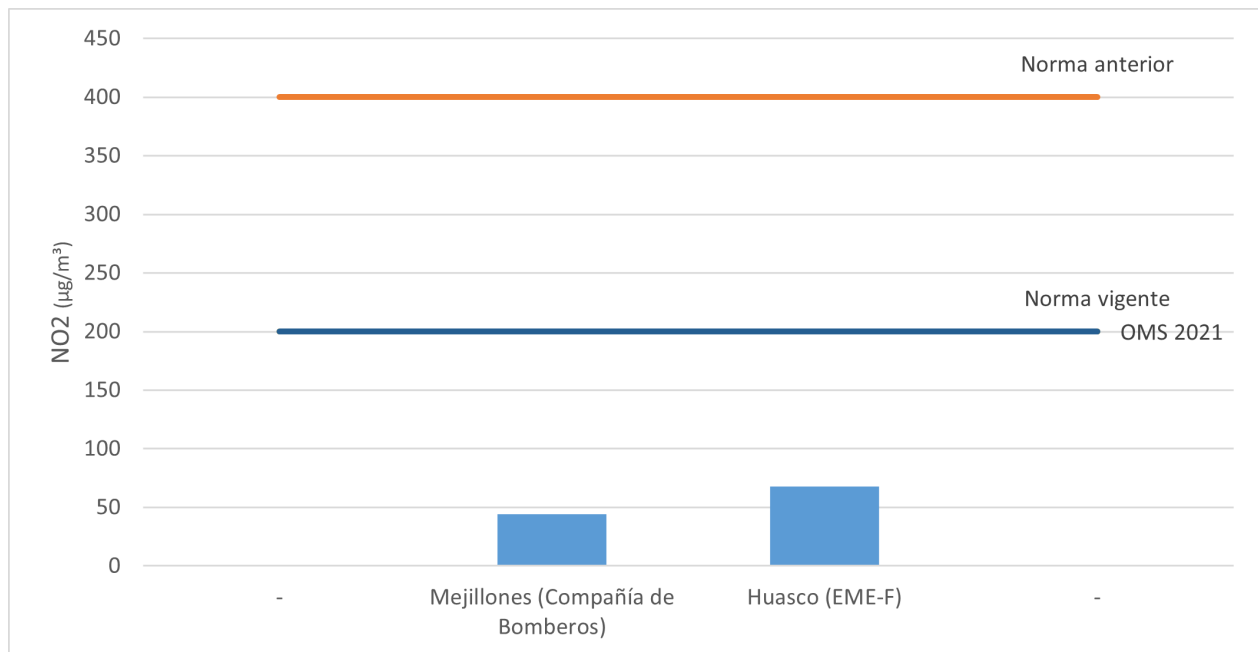


Figura 4.8: Comparación de valores en promedio de 1 hora correspondientes al año 2023 en norma horaria de NO₂ nacional y recomendaciones internacionales.

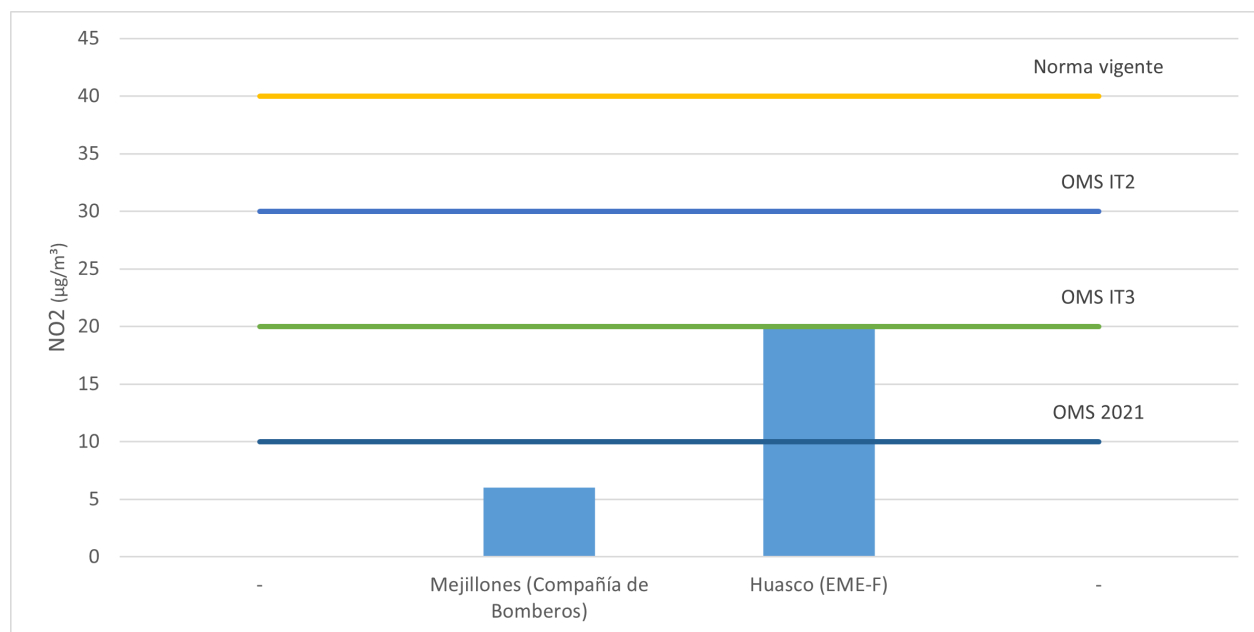


Figura 4.9: Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de NO₂ nacional y recomendaciones internacionales.

4.3.2. Dióxido de azufre

Tabla 4.12: Valores de calidad del aire para SO₂ en µg/m³ según normativa nacional y directrices de la OMS.

SO ₂	1 hora	24 horas	Anual
Norma vigente (2018)*	350	150	60
OMS IT1	-	125	-
Anteproyecto norma**	262	105	50
OMS IT2	-	50	-
OMS IT3	-	40	-

* [Ministerio del Medio Ambiente, 2019a]

** [Ministerio del Medio Ambiente, 2025]

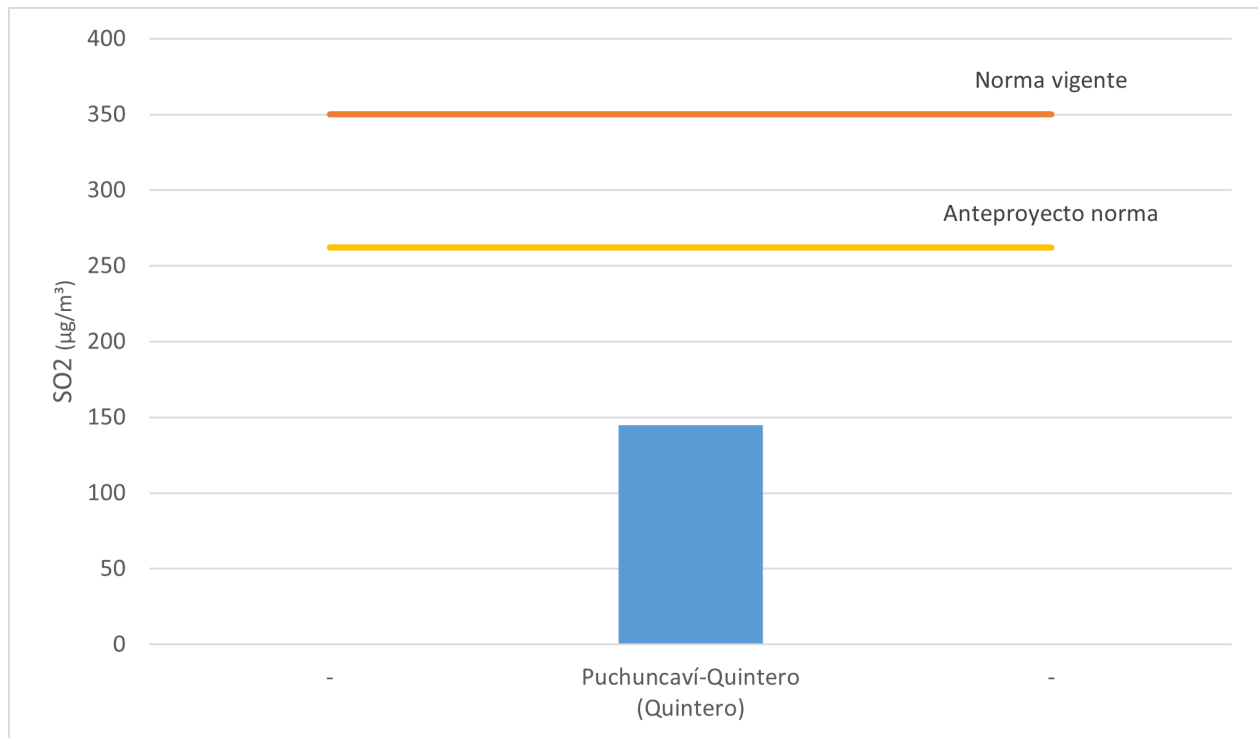


Figura 4.10: Comparación de valores en promedio de 1 hora correspondientes al año 2023 en norma horaria de SO₂ nacional y recomendaciones internacionales.

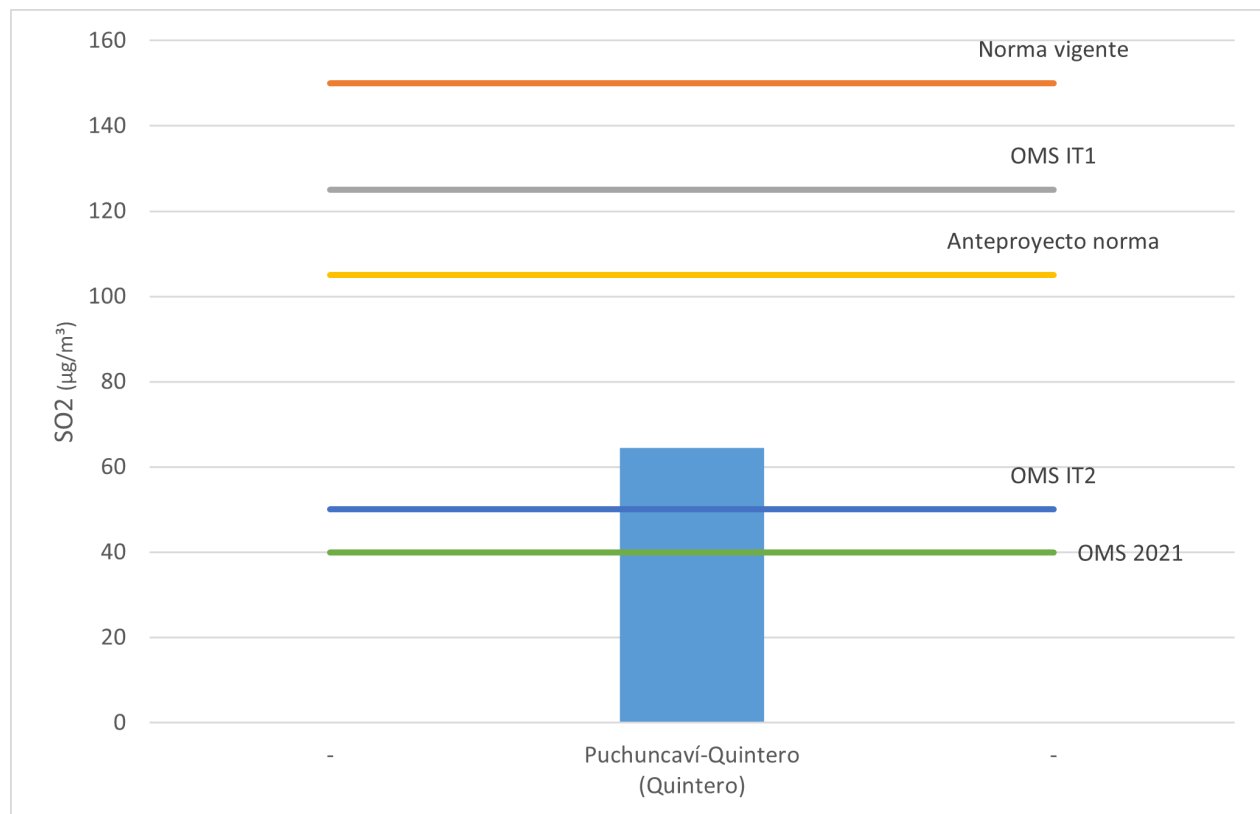


Figura 4.11: Comparación de valores en promedio de 24 horas correspondientes al año 2023 en norma horaria de SO₂ nacional y recomendaciones internacionales.

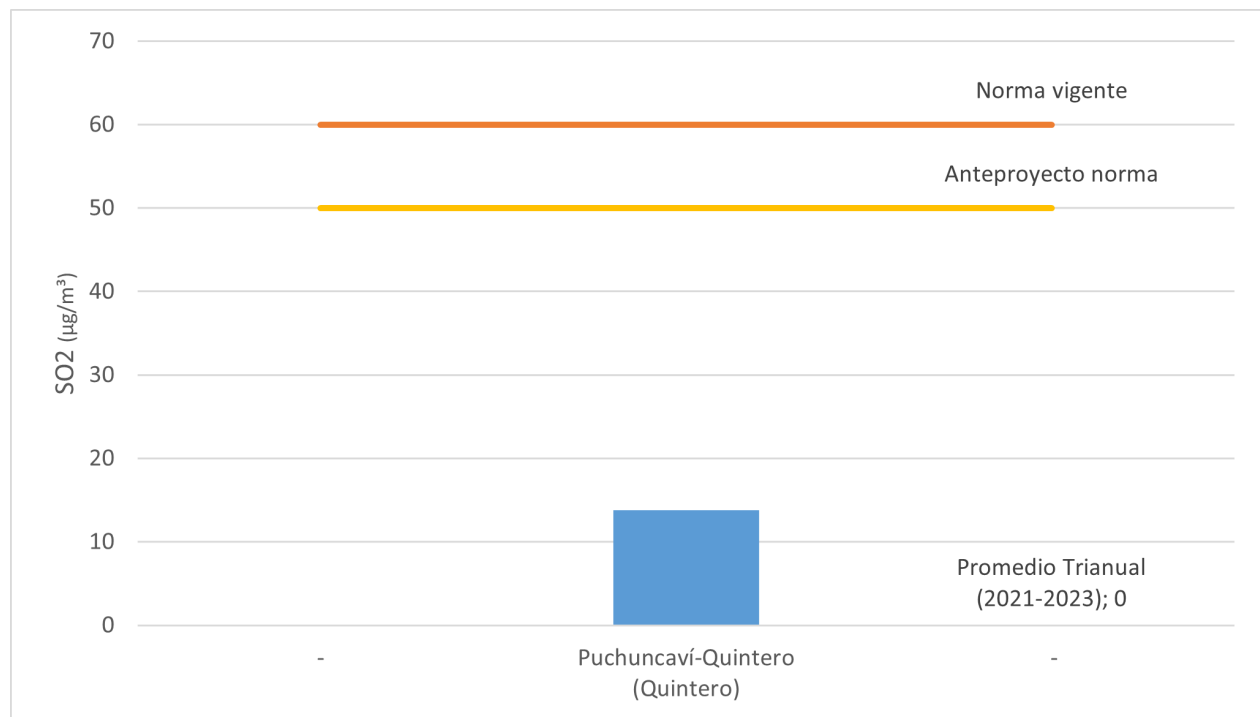


Figura 4.12: Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de SO₂ nacional y recomendaciones internacionales.

4.3.3. Material particulado respirable

Tabla 4.13: Valores de calidad del aire para MP₁₀ en µg/m³ según normativa nacional y directrices de la OMS.

MP ₁₀	24 horas	Anual
OMS IT1	150	70
Norma anterior (1998)*	150	70
Norma actual (2022)**	150	70
OMS IT2	100	50
OMS IT3	75	30
OMS IT4 (OMS 2005)	50	20
OMS 2021	45	15

* [Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998]

** [Ministerio del Medio Ambiente, 2022a]

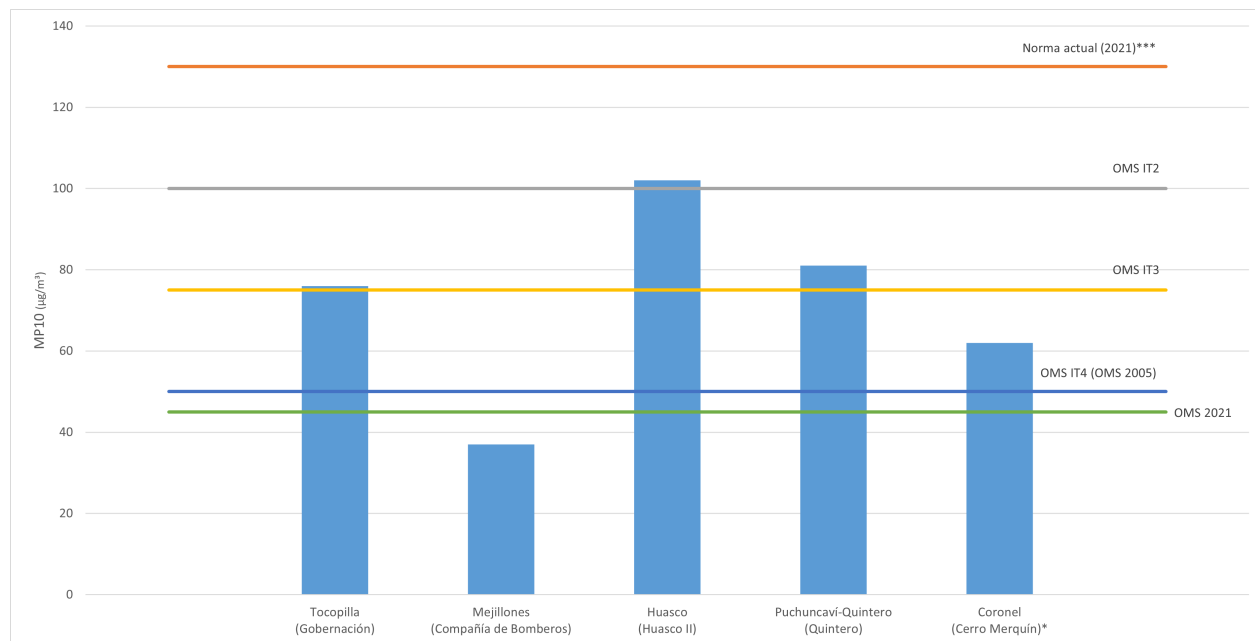


Figura 4.13: Comparación de valores en promedio de 24 horas correspondientes al año 2023 en norma horaria de MP_{10} nacional y recomendaciones internacionales.

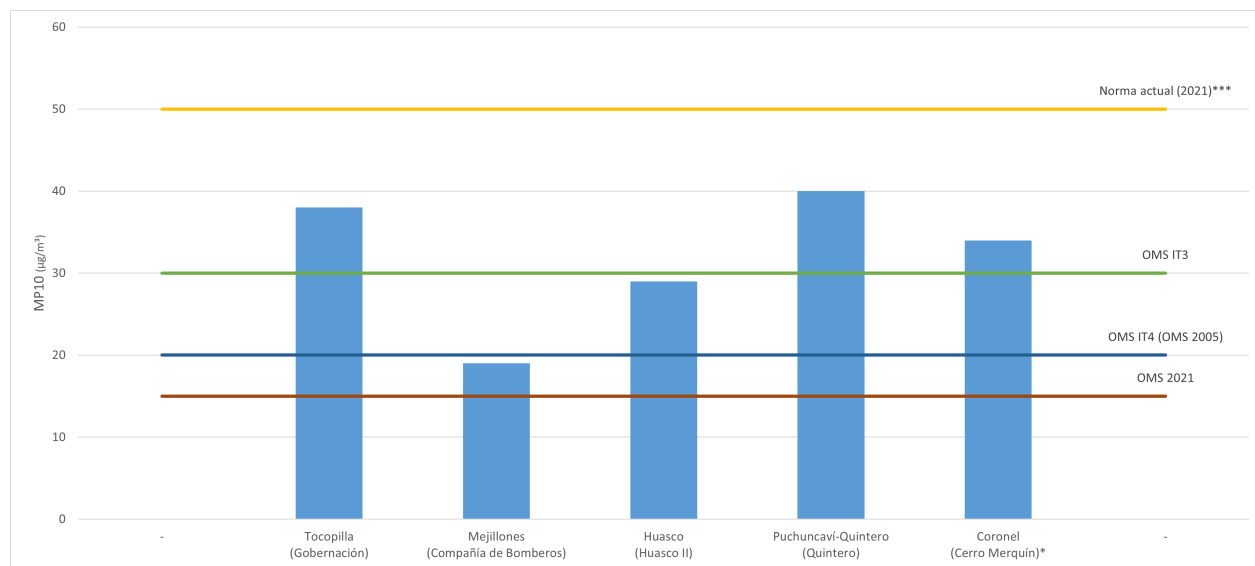


Figura 4.14: Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de MP_{10} nacional y recomendaciones internacionales.

4.3.4. Material particulado fino

Tabla 4.14: Valores de calidad del aire para $MP_{2,5}$ en $\mu g/m^3$ según normativa nacional y directrices de la OMS.

$MP_{2,5}$	24 horas	Anual
OMS IT1	75	35
OMS IT2	50	25
Norma vigente (2011)*	50	20
Anteproyecto norma**	38	15
OMS IT3	37,5	15
OMS IT4 (OMS 2005)	25	10
OMS 2021	15	5

* [Ministerio del Medio Ambiente, 2011]

** [Ministerio del Medio Ambiente, 2024a]

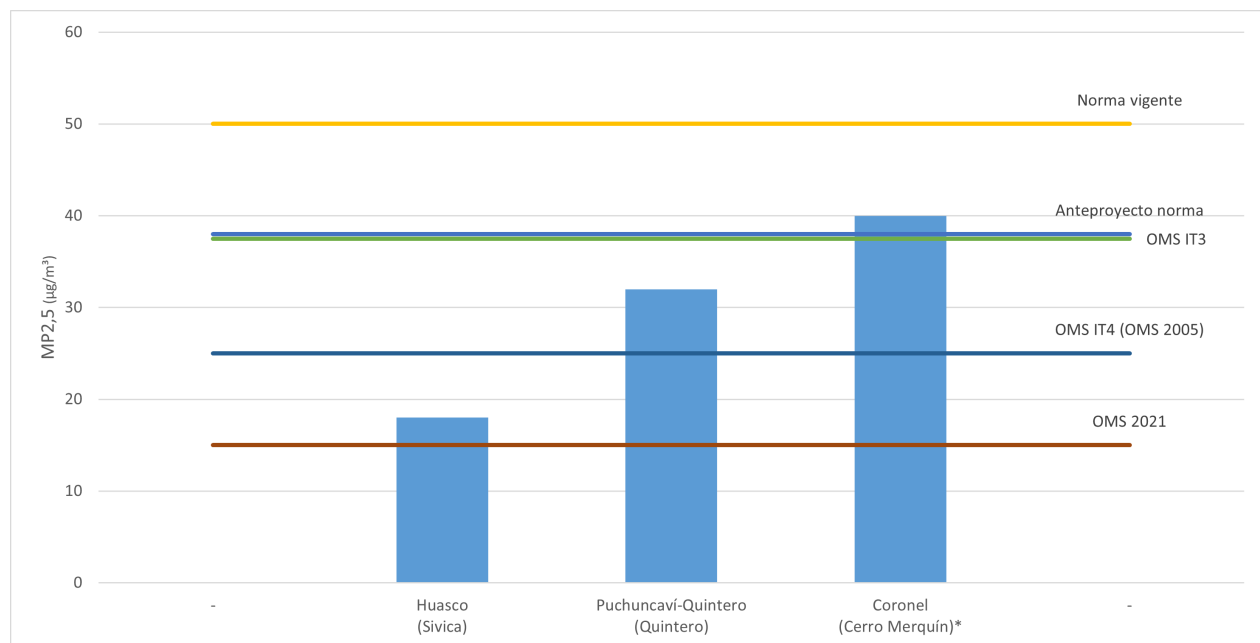


Figura 4.15: Comparación de valores en promedio de 24 horas correspondientes al año 2023 en norma horaria de $MP_{2,5}$ nacional y recomendaciones internacionales.

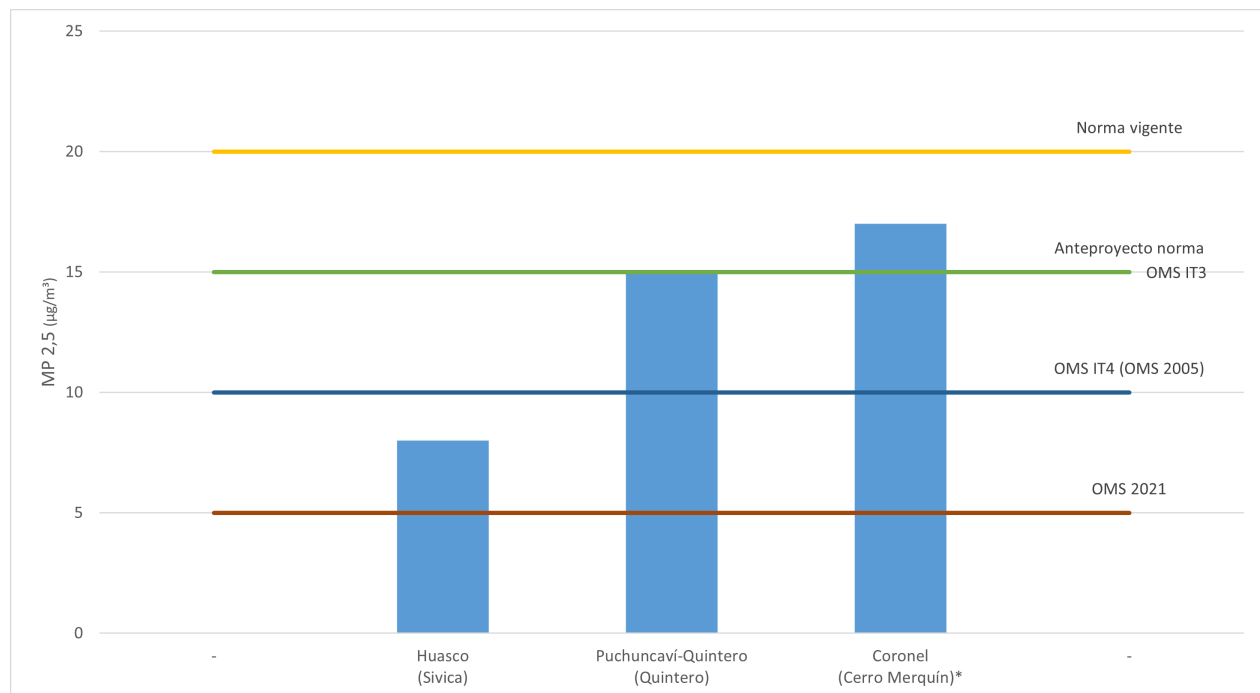


Figura 4.16: Comparación de valores en promedio trianual correspondientes al año 2023 en norma anual de MP_{2,5} nacional y recomendaciones internacionales.

4.4. Análisis de datos de salud disponibles

Como cierre del análisis ambiental y normativo, se realizó un ejercicio exploratorio de análisis de datos de salud, utilizando registros de atenciones médicas de urgencia por enfermedades respiratorias. Estos datos fueron facilitados por la académica Dra. Karla Yohannessen, quien proporcionó información correspondiente a 26 centros de atención de urgencia, ubicados en comunas con presencia directa o indirecta de centrales termoeléctricas a carbón, para el período comprendido entre 2010 y noviembre de 2024.

4.4.1. Selección de macrozonas y centros de salud

Se definieron dos macrozonas de análisis, la primera correspondiente a parte de la Región de Antofagasta, donde se seleccionaron cuatro comunas con distintos niveles de exposición a generación eléctrica a carbón. En particular, se incluyó Tocopilla, como la primera comuna del país en alcanzar generación eléctrica cero a carbón; Mejillones, la comuna con mayor participación de generación a carbón a nivel nacional y Antofagasta, María Elena y Sierra Gorda, comunas sin generación directa, utilizadas como referencia espacial.

Tabla 4.15: Datos obtenidos de centros de atención de urgencia de las comunas periféricas a la zona Tocopilla y Mejillones.

ID	Establecimiento	Comuna
03-100	Hospital Dr. Leonardo Guzmán	Antofagasta
03-102	Hospital Dr. Marcos Macuada	Tocopilla
03-104	Hospital de Mejillones	Mejillones
03-800	SAPU Norte de Antofagasta	Antofagasta
03-801	SAPU Antonio Rendic	Antofagasta
03-802	SAPU Corvallis	Antofagasta
03-804	SAPU Juan Pablo II de Antofagasta	Antofagasta
03-900	SAPU Central Oriente de Antofagasta	Antofagasta
03-901	SAPU Centro Sur de Antofagasta	Antofagasta
03-917	Centro Oncológico del Norte (CON)	Antofagasta
03-926	SAR Coviefi	Antofagasta
03-943	SUR Baquedano	Sierra Gorda
03-944	SUR María Elena	María Elena
03-945	SUR Sierra Gorda	Sierra Gorda

La segunda macrozona corresponde a la Región del Biobío, centrada en la comuna de Coronel, la cual presenta durante el período de estudio tanto eventos de entrada en operación (Bocamina II en 2012) como de cierre de centrales a carbón (Bocamina I en 2020 y Bocamina II en 2022). Adicionalmente, se incorporaron comunas cercanas: Lota, Chiguayante y San Pedro de la Paz.

Tabla 4.16: Datos obtenidos de centros de atención de urgencia de las comunas periféricas a la zona Coronel.

ID	Establecimiento	Comuna
18-105	Hospital San José	Coronel
18-106	Hospital de Lota	Lota
18-807	SAPU Dental Chiguayante	Chiguayante
18-808	SAPU Dental San Pedro de la Paz	San Pedro de la Paz
18-812	SAPU Lagunillas	Coronel
18-813	SAPU Yobilo	Coronel
18-814	SAPU Leonera	Chiguayante
18-818	SAPU Loma Colorada	San Pedro de la Paz
18-912	SAR Chiguayante	Chiguayante
18-913	SAR San Pedro	San Pedro de la Paz
18-924	SAR Boca Sur	San Pedro de la Paz
18-977	SAPU Dr. Juan Cartes Arias	Lota

Los datos fueron analizados mediante gráficos tipo boxplot, presentados de forma anual, con el objetivo de evaluar la dispersión y variabilidad interanual de las atenciones de urgencia, identificar la presencia de valores atípicos y facilitar comparaciones visuales con la evolución del consumo de carbón.

Dado que el análisis se enfoca en enfermedades respiratorias, se identificaron períodos que introducen ruido estadístico, los cuales deben ser considerados, como la pandemia por COVID-19, con la cuál se espera un aumento de atenciones fuera de lo normal en 2019 y 2022, así como una disminución en 2020 y 2021 debido a los periodos de confinamiento. Además, Chile también se vio sometido a un brote de influenza H1N1 en entre 2009 y 2010, por lo que estos resultados también deben interpretarse de manera contextualizada.

4.4.2. Resultados exploratorios

Hospital de Tocopilla

El primer análisis, correspondiente al hospital de la comuna de Tocopilla, se observa que, si bien los resultados no permiten establecer conclusiones causales, sí se aprecia una relación visual entre el consumo de carbón y la dispersión de las atenciones de urgencia, particularmente en la aparición de valores atípicos. Lo que puede ser de especial relevancia considerando que Tocopilla tiene una participación casi exclusiva de emisiones de carbón.

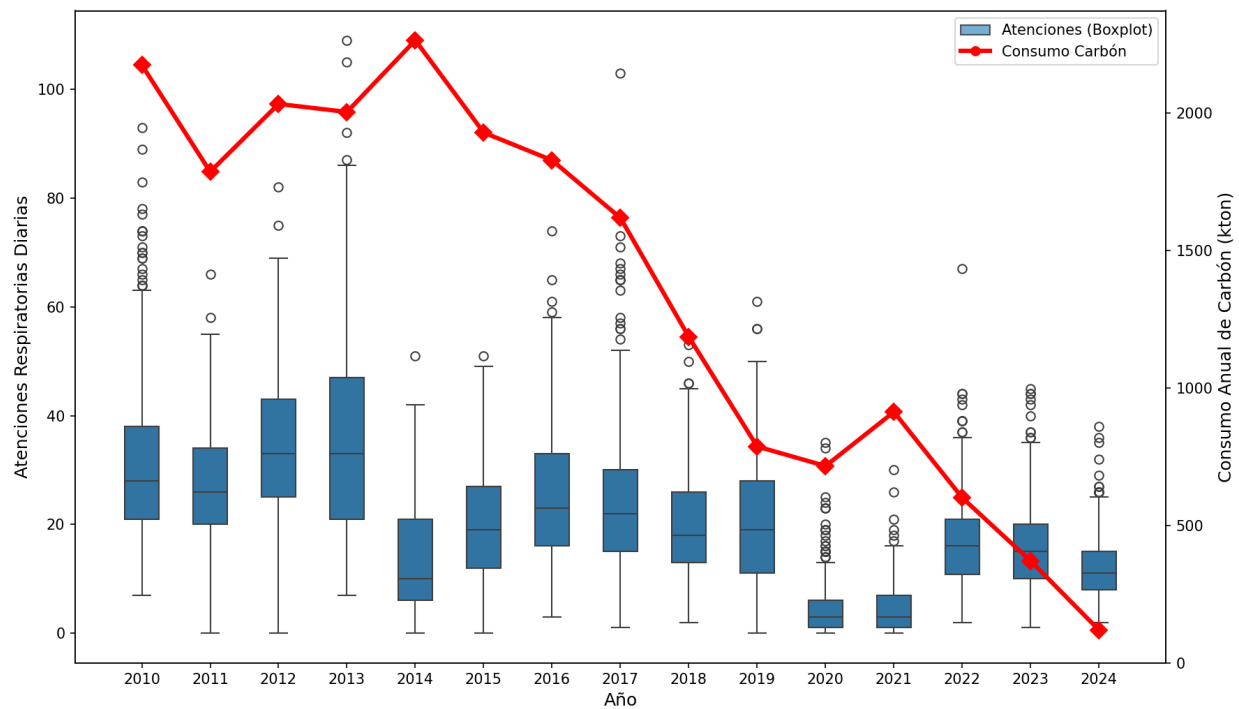


Figura 4.17: Comparación de atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en Tocopilla, en Hospital de Tocopilla.

Hospital de Mejillones

En Mejillones, el consumo de carbón es bajo al inicio del período (2010), dado que solo se encontraba operativa la Central Térmica Mejillones, cuyas unidades datan de 1996 y 1998. El aumento significativo del consumo se produce a partir de 2011, con la entrada en operación de nuevas unidades en 2011, 2016 y 2019.

A diferencia de Tocopilla, no se observa una correlación clara entre consumo de carbón y atenciones de urgencia. Este resultado es consistente con el análisis de calidad del aire, donde Mejillones no presenta concentraciones cercanas a umbrales de latencia, lo que refuerza la hipótesis del rol relevante de factores de dispersión atmosférica.

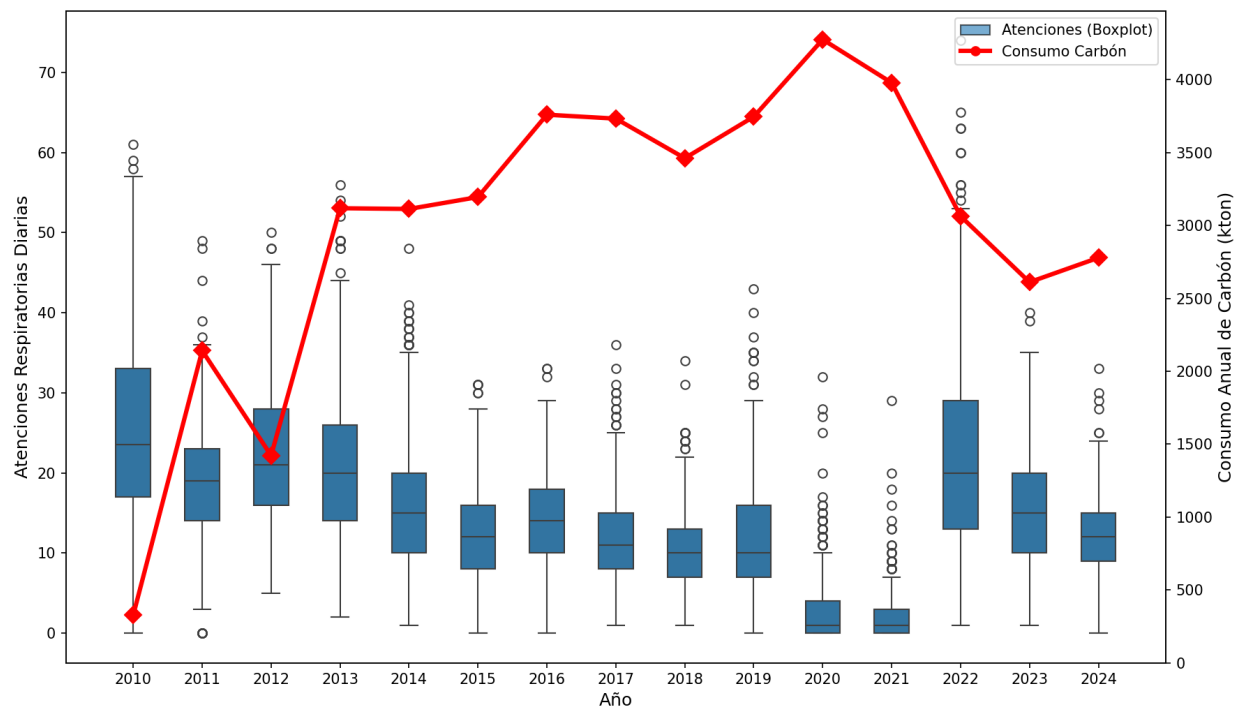


Figura 4.18: Comparación de atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en Tocopilla, en Hospital de Mejillones.

Hospital de Coronel

En Coronel, el aumento del consumo de carbón está directamente asociado a la entrada en operación de Bocamina II en 2012. Los gráficos muestran cambios en la dispersión de las atenciones durante los años de mayor consumo, aunque estos resultados se consideran preliminares y sensibles a factores externos.

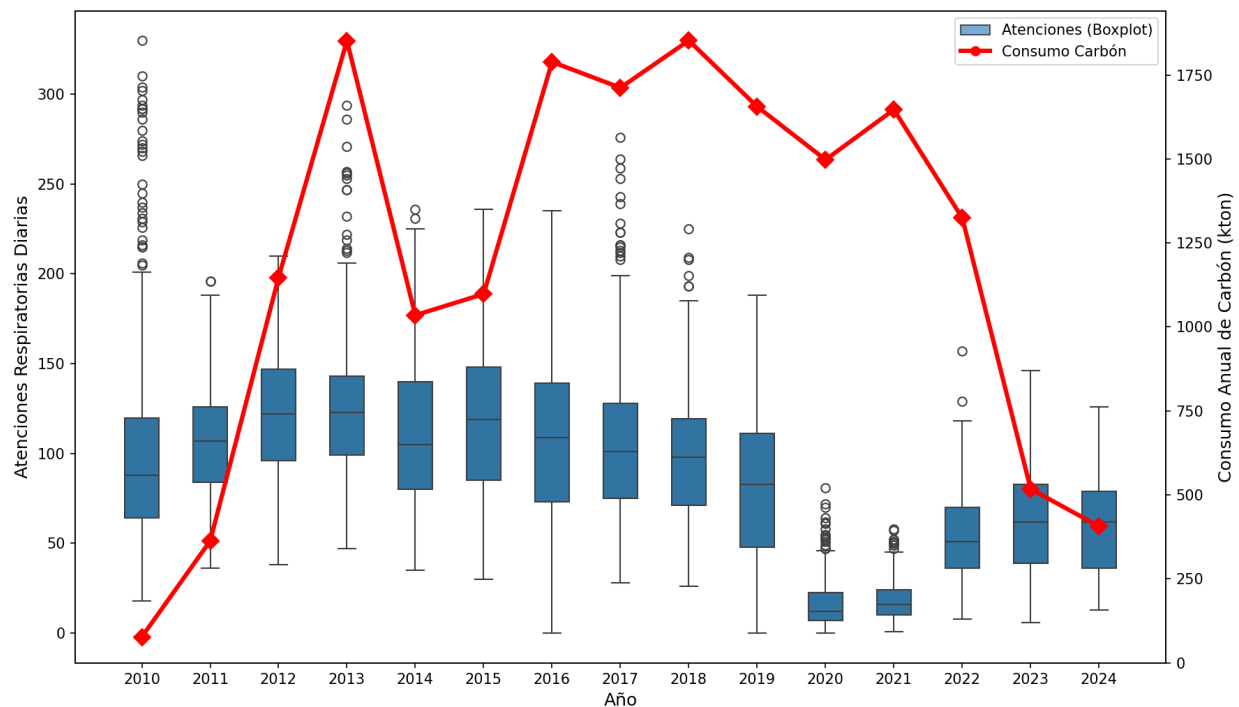


Figura 4.19: Comparación de atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en Coronel, en Hospital de Coronel.

Algunas comparaciones ampliadas, como el análisis agregado por macrozona y el análisis de centros ubicados a menos de 10 km de centrales termoeléctricas, se presentan en el Anexo D, dada su naturaleza complementaria.

4.5. Conclusiones de normativa nacional y recomendaciones internacionales

A partir del análisis integrado de las estimaciones de emisiones, la revisión de la normativa ambiental vigente y el análisis exploratorio de datos de salud, se identifican una serie de conclusiones relevantes para la evaluación del proceso de descarbonización del parque termoeléctrico a carbón en Chile.

El análisis normativo evidencia limitaciones estructurales asociadas a un enfoque centrado exclusivamente en concentraciones atmosféricas. El caso de Mejillones resulta ilustrativo, ya que el cumplimiento de las normas de calidad del aire se encuentra fuertemente condicionado por factores de ventilación y dispersión, sin que ello refleje necesariamente una baja carga de emisiones provenientes de las fuentes industriales presentes en la zona. La evaluación regulatoria vigente no considera otros receptores relevantes de contaminación, tales como la acumulación de contaminantes en suelos, cuerpos de agua o los efectos sanitarios crónicos sobre la población expuesta. Es por esto que se encuentra necesario establecer un plan de gestión o límites específicos para la industria adyacente, incluyendo las unidades operativas restantes (Cochrane 1 y 2). La ausencia de

declaración de zona saturada no debe ser excusa para permitir emisiones ilimitadas, debiéndose aplicar un principio preventivo.

Luego, el análisis comparativo de los instrumentos de gestión ambiental vigentes muestra que, si bien el Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica de Huasco ha sido eficaz en el control de las emisiones de NO_x , resulta insuficiente frente a los desafíos actuales asociados al material particulado. De forma similar, en la zona centro-sur se observa que la aplicación de reducciones porcentuales fijas, como el 30% establecido para ciertas fuentes, no garantiza necesariamente la superación de condiciones de latencia en $\text{MP}_{2,5}$. Se requiere avanzar hacia límites de emisión basados en la capacidad de carga real de la cuenca atmosférica, más que en reducciones relativas a un año base histórico.

Finalmente, el análisis de datos de salud desarrollado en este estudio debe ser interpretado como un ejercicio de carácter exploratorio, el cual abre múltiples líneas de investigación futura. No obstante, este análisis abre posibles líneas de investigación futuras de alto valor, particularmente en un contexto donde, por una parte, se espera una reducción progresiva del ruido estadístico asociado a la pandemia de COVID-19, y, por otra, se proyectan cierres y procesos de reconversión relevantes del parque termoeléctrico a carbón durante los próximos años. Estas condiciones configuran una oportunidad única para evaluar con mayor robustez los impactos sanitarios asociados al avance del proceso de descarbonización.

CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo general analizar las emisiones del parque termoeléctrico a carbón en Chile durante el período 2015-2040, considerando su relación con la normativa ambiental vigente y recomendaciones internacionales en materia de salud. Para ello, se abordó un enfoque integrado que incluyó la caracterización del parque generador, la estimación de emisiones históricas, la proyección bajo distintos escenarios de descarbonización y la evaluación de cumplimiento normativo en las comunas con presencia de generación a carbón.

Las centrales se clasificaron según su ubicación, capacidad instalada, tecnologías de combustión y año de entrada en operación, especificando cada unidad. Asimismo, se revisaron metodologías internacionales y nacionales para el cálculo de emisiones atmosféricas, obteniendo sus factores de emisión, y abatimientos por cada actor que reporte su consumo, todos los valores utilizados se encuentran citados y escritos en anexos, buscando construir una base metodológica robusta y replicable. A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas del estudio

Conclusiones generales

Los resultados de las estimaciones de emisiones históricas en el período 2015-2024 evidenciaron, en términos generales, una consistencia razonable entre las estimaciones realizadas y los valores reportados por el RETC. Las diferencias observadas se explican por diversos supuestos metodológicos adoptados en este estudio, entre ellos, la suposición del uso exclusivo del carbón sub-bituminoso, el porcentaje de azufre presente en el combustible, la eficiencia real de los sistemas de abatimiento y particularidades tecnológicas de algunas unidades generadoras.

El análisis del RETC evidencia que se trata de una base de datos extensa y detallada, orientada a identificar y categorizar una amplia gama de fuentes emisoras a nivel nacional. Sin embargo, este gran alcance presenta debilidades, entre ellas vacíos en los valores publicados de material particulado, lo que sugiere que situaciones similares podrían presentarse en otras fuentes de emisión. Asimismo, se identificaron oportunidades de mejora en futuras actualizaciones metodológicas, tales como la incorporación sistemática de información sobre el contenido de azufre del carbón importado proveniente de los principales países exportadores, o de los estudios periódicos de calidad de combustibles desarrollados por el CEN. Adicionalmente, se recomienda evaluar la inclusión de nuevos GEI como el metano, en los reportes sectoriales.

Las proyecciones de emisiones al año 2040 confirman que el ritmo de descarbonización es un factor determinante en la magnitud de reducciones alcanzadas. Mientras los escenarios basados en compromisos actuales y cierres progresivos logran reducciones sustantivas hacia 2035 y 2040, estos mantienen emisiones residuales asociadas al co-firing con amoníaco. En contraste, el escenario de operación sin carbón al 2030 elimina completamente las emisiones los contaminantes analizados desde comienzos de la década de 2030, adelantando en aproximadamente diez años los beneficios ambientales y sanitarios, y evitando emisiones acumuladas

significativas en el período intermedio. Este adelanto resulta especialmente relevante para contaminantes con impactos locales en salud, como SO_2 , NO_x , MP_{10} y $\text{MP}_{2,5}$.

El análisis de cumplimiento normativo evidencia que el cumplimiento formal de las normas de calidad del aire no necesariamente refleja una baja carga ambiental. Si bien en los próximos años es esperable que las emisiones totales disminuyan debido al cierre de unidades, resulta fundamental que este proceso no sea utilizado como justificación para un aumento o estancamiento de emisiones por parte de las centrales remanentes. Los esfuerzos regulatorios deben mantenerse de manera sostenida, de modo que las comunidades reciban plenamente los beneficios de la descarbonización. Este enfoque debiese ser considerado en futuras actualizaciones de los planes de descontaminación, estableciendo límites claros y sin retrocesos para cada central en operación.

Bajo todo lo anterior se concluye que es posible construir estimaciones consistentes y proyecciones robustas que aporten evidencia técnica relevante para la toma de decisiones en materia de descarbonización y regulación ambiental. Los resultados refuerzan la importancia de acelerar la salida del carbón del sistema eléctrico chileno, y presionar la salida de las centrales a 2035 o antes, evitando los programas laxos hacia 2040, los cuáles podrían generar un estancamiento en la reducción de emisiones en lugar de una disminución sostenida en el tiempo. Avanzar hacia un cierre más temprano permitirá, además, contribuir a saldar parte de la deuda histórica con las comunidades que han debido soportar la carga ambiental y sanitaria asociada a este tipo de generación.

Conclusiones específicas

En el caso de monóxido de carbono, las emisiones estimadas superan ampliamente las históricamente reportadas por el RETC antes de su cambio metodológico, lo que resulta consistente con la operación de unidades de lecho fluidizado. En óxidos de nitrógeno, las estimaciones concuerdan razonablemente con los datos oficiales. Para dióxido de azufre las discrepancias observadas se explican principalmente por incertidumbres asociadas al contenido real de azufre del carbón importado, al momento de instalación de los sistemas de abatimiento, y al porcentaje de carbón subbituminoso y bituminoso utilizado. En cuanto a material particulado, se encontró un vacío importante en el reporte del RETC, ya que, aun considerando sistemas de abatimiento avanzados, las emisiones no se reducen a cero.

Un aporte relevante de este trabajo es la estimación de emisiones de metano del sector termoelectrico a carbón, contaminante que no es reportado actualmente por el RETC para este sector, contribuyendo así a una caracterización más completa de los gases de efecto invernadero asociados a esta tecnología. La comparación con planes de descarbonización y antecedentes proporcionados por empresas muestra que las estimaciones desarrolladas presentan un carácter conservador, al basarse en factores de emisión estándar, consumos de combustible reportados y eficiencias de abatimiento declaradas. Este enfoque, si bien permite una comparación homogénea entre instalaciones y períodos, no incorpora variables operacionales relevantes,

tales como la carga efectiva de las calderas, el manejo de la humedad del combustible ni optimizaciones específicas de operación, las cuales podrían conducir a una reducción de las emisiones reales respecto de las estimadas.

Desde el punto de vista normativo, casos como Mejillones evidencian que condiciones de ventilación favorables pueden enmascarar niveles elevados de emisión, generando una vulnerabilidad regulatoria frente a cambios meteorológicos o aumentos de producción. En zonas como Quintero–Puchuncaví y Coronel, los márgenes estrechos respecto de los umbrales normativos y la persistencia de estados de latencia, especialmente para material particulado, indican que las medidas actuales son insuficientes para garantizar una mejora estructural de la calidad del aire.

Recomendaciones

El cierre de las termoeléctricas a carbón es un estudio que debe permanecer en seguimiento, considerando que a la fecha de término de este documento, enero de 2026, sólo se ha concretado cierre de la central mejillones, con sus unidades CTM 1 y CTM 2, además de el cese de generación de IE Mejillones, contabilizando en total 711 MW de electricidad sin carbón. En contraste, otros compromisos de cierre, como el de la central Angamos, no se han materializado pese a los anuncios y plazos comunicados en años anteriores. Lo cuál es grave, ya que dada la magnitud de las emisiones asociadas a la generación eléctrica a carbón, cada reducción de generación o cierre de una planta puede generar grandes beneficios en temas de salud a las comunidades de la zona.

El análisis de datos de salud desarrollado en este estudio debe ser interpretado como un ejercicio de carácter exploratorio, el cual abre múltiples líneas de investigación futura. Donde se podría profundizar este tipo de análisis mediante el uso de datos diarios de atenciones de urgencia en relación con la generación eléctrica diaria, con el fin de encontrar peaks de emisión y posibles episodios agudos de enfermedades respiratorias, y/o incorporar información de emisiones en chimenea reportadas a través de la plataforma SNIFA y complementadas con series históricas de calidad del aire. Este tipo de estudios adquirirían en el contexto post-pandemia, donde se espera una disminución progresiva del ruido estadístico asociado al COVID-19, junto con cierres y procesos de reconversión relevantes del parque termoeléctrico en los próximos años.

También, si bien queda fuera de alcance de este trabajo, no se puede dejar de mencionar que un cierre de termoeléctricas debe manejarse bajo estándares éticos y de transición justa. Esto implica priorizar la reubicación o la capacitación de trabajadores existentes en áreas afines, y, cuando ello no sea posible, asegurar el acceso a herramientas efectivas que faciliten una recolocación laboral segura, minimizando los períodos de transición y entregando información clara respecto de los beneficios ambientales y sanitarios asociados al cese de generación a carbón.

En materia de información pública y transparencia, se recomienda avanzar hacia una mayor disponibilidad de datos ambientales, particularmente en lo relativo a las bases de datos del RETC asociadas a sistemas de

abatimiento. Considerando la magnitud y complejidad de esta base de datos, una publicación progresiva, priorizando grandes fuentes emisoras adscritas al impuesto verde, permitiría facilitar la investigación independiente, la evaluación cruzada de resultados y la formulación de propuestas de mejora al sistema actual. Asimismo, se podría evaluar actualizar y depurar periódicamente la información disponible vía transparencia, dado el nivel de desactualización identificado durante el desarrollo de este estudio.

En materia de información pública y transparencia, se recomienda avanzar hacia una mayor disponibilidad de datos ambientales, particularmente en lo relativo a las bases de datos del RETC asociadas a sistemas de abatimiento. Considerando la magnitud y complejidad de esta base de datos, una publicación progresiva, priorizando grandes fuentes emisoras adscritas al impuesto verde, permitiría facilitar la investigación independiente, la evaluación cruzada de resultados y la formulación de propuestas de mejora al sistema actual. Asimismo, se podría evaluar la actualización de la información disponible vía transparencia, dado el nivel de desactualización identificado durante el desarrollo de este estudio.

Como reflexión final, un sentimiento constante durante el desarrollo de este trabajo ha sido la incertidumbre respecto de la forma en que se ha llevado el proceso de descarbonización. Si bien existen múltiples escenarios técnicamente factibles y documentados, su materialización depende de condiciones que exceden el ámbito técnico. La ausencia de mecanismos efectivos de presión y fiscalización para asegurar el cumplimiento de los compromisos, la falta de continuidad de políticas públicas alineadas en el tiempo, la limitada voluntad de algunas empresas, y a veces la falta de coordinación con las autoridades y el Coordinador Eléctrico Nacional, como ha ocurrido en casos como Angamos y previamente con las unidades remanentes de la central Ventanas, restringen de forma significativa la reducción efectiva de emisiones. Esta situación introduce además incertidumbre regulatoria y financiera, afectando decisiones de inversión, y tiene impactos directos sobre las personas que trabajan y habitan en las denominadas zonas de sacrificio. Así, la falta de coherencia y compromiso estructural limita el funcionamiento adecuado y el alcance de estudios como el presente, cuyos resultados dependen en última instancia de que los procesos de descarbonización se concreten según los compromisos asumidos, de manera oportuna y verificable.

Bibliografía

- [AES Andes, 2024] AES Andes (2024). Aes andes acuerda venta de unidades térmicas ventanas. Comunicado de prensa. <https://www.aesandes.com/es/press-release/aes-andes-acuerda-venta-de-unidades-termicas-en-ventanas>.
- [AES Gener S.A., 2019] AES Gener S.A. (2019). Informe de determinación de parámetros de los procesos de partida y detención de las unidades Nueva Tocopilla. Technical report, Coordinador Eléctrico Nacional. <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2019/08/2019.08.01-Informe-PPD-Nueva-Tocopilla.pdf>.
- [Ahmad et al., 2023] Ahmad, A. H., Darmanto, P. S., and Juangsa, F. B. (2023). Thermodynamic analysis of ammonia co-firing for low-rank coal-fired power plant. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1):527–544. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2208689>.
- [Centro Nacional del Medio Ambiente, 2015] Centro Nacional del Medio Ambiente (2015). Efectos del SO₂ en la salud de las personas. Informe técnico, Universidad de Chile. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/VI_Efectos_del_SO2_en_la_salud_de_las_personas.pdf.
- [Comisión Nacional de Energía, 2025a] Comisión Nacional de Energía (2025a). Producción y consumo: Consumo de combustibles SEN. [Archivo Excel]. <https://www.cne.cl/normativas/electrica/consulta-publica/electricidad/>. Consultado el 12 de diciembre de 2025.
- [Comisión Nacional de Energía, 2025b] Comisión Nacional de Energía (2025b). Producción y consumo: Generación bruta SEN. [Archivo Excel]. <https://www.cne.cl/normativas/electrica/consulta-publica/electricidad/>. Consultado el 12 de diciembre de 2025.
- [Coordinador Eléctrico Nacional, 2024] Coordinador Eléctrico Nacional (2024). Estudio de confiabilidad SEN: Reporte de operación sin carbón al 2030. Technical report, Coordinador Eléctrico Nacional. <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2024/12/Reporte-Operacion-SEN-sin-Carbon-2030.pdf>.

- [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025a] Coordinador Eléctrico Nacional (2025a). Histórico de capacidad instalada, total por tecnología (desde 2000). [Archivo Excel]. <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>. Consultado el 12 de diciembre de 2025.
- [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025b] Coordinador Eléctrico Nacional (2025b). Histórico generación de energía, por tecnología (desde 2000). [Archivo Excel]. <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>. Consultado el 12 de diciembre de 2025.
- [Coordinador Eléctrico Nacional, 2025c] Coordinador Eléctrico Nacional (2025c). Informe DEAS-GM-SEN n°21/2025: Respuesta CNE Of. Ord. n°807/2025. Informe técnico, Coordinador Eléctrico Nacional. Consultado el 12 de diciembre de 2025.
- [E-CL S.A., 2016] E-CL S.A. (2016). Memoria anual 2015 y estados financieros. Technical report, E-CL S.A. <https://www.engie.cl/wp-content/uploads/2023/04/201504-Memoria-Anual-E-CL-y-Estados-Financieros-1.pdf>.
- [Escobar et al., 2006] Escobar, J., Jorquera, H., Fresard, F., Bordones, J. C., Pfeng, C., Espejo, A., Miranda, M., and Hinojosa, O. (2006). Análisis de la calidad del aire para mp-10 en tocopilla. Informe Final Código B.I.P. 30060200-0, DICTUC S.A. y Gobierno Regional de Antofagasta. https://www.dim.uchile.cl/~lgallard/VOCALS/MONITORING/Informe_Final_Calidad_AIRE_PM10_TOCOPILLA.pdf.
- [Gobierno de Chile, 2025] Gobierno de Chile (2025). Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile: Actualización 2025. Technical report, Ministerio del Medio Ambiente. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/09/NDC-2025-2035.pdf>.
- [Guacolda Energía SpA, 2025] Guacolda Energía SpA (2025). Memoria integrada 2024. Technical report, Guacolda Energía SpA. <https://guacoldaenergia.cl/memoria2024.pdf>.
- [Gómez et al., 2006] Gómez, D. R., Watterson, J. D., Americano, B. B., Ha, C., Marland, G., Matsika, E., Namayanga, L. N., Osman-Elasha, B., Saka, J. D. K., and Treanton, K. (2006). Stationary combustion. In 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, volume 2: Energy, chapter 2. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.
- [Inodú, 2018] Inodú (2018). Estudio de variables ambientales y sociales que deben abordarse para el cierre o reconversión programada y gradual de generación eléctrica a carbón. Informe Final Licitación ID 584105-9-LE18, Ministerio de Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/12_2018_inodu_variables_ambientales_y_sociales.pdf.

- [Ministerio de Energía, 2019] Ministerio de Energía (2019). Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón. Technical report, Ministerio de Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/plan_de_retiro_y_o_reconversion_centrales_carbon.pdf.
- [Ministerio de Energía, 2020] Ministerio de Energía (2020). Decreto exento n° 50: Aprueba acuerdos de retiro de centrales termoeléctricas a carbón. https://energia.gob.cl/sites/default/files/decreto_exento_n_50.pdf.
- [Ministerio de Energía, 2024a] Ministerio de Energía (2024a). Plan de descarbonización: Borrador para consulta pública. Technical report, Ministerio de Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20241108_plan_descarbonizacion.pdf.
- [Ministerio de Energía, 2024b] Ministerio de Energía (2024b). Planificación energética de largo plazo (PELP) 2023-2027: Informe final. Technical report, Ministerio de Energía. <https://energia.gob.cl/documentos/pelp-2023-2027-informe-final>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2011] Ministerio del Medio Ambiente (2011). Decreto 12: Establece norma primaria de calidad del aire para material particulado fino respirable MP 2,5. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1025202>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2017] Ministerio del Medio Ambiente (2017). Decreto 38: Establece plan de prevención de contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1107021&f=2017-08-30&p=>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2019a] Ministerio del Medio Ambiente (2019a). Decreto 104: Establece norma primaria de calidad del aire para dióxido de azufre SO₂. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1131641>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2019b] Ministerio del Medio Ambiente (2019b). Decreto 6: Establece plan de prevención y de descontaminación atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1140121&f=2019-12-17>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2019c] Ministerio del Medio Ambiente (2019c). Decreto supremo n° 105: Aprueba plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/04/56._PPDA_CQP_DO_2587-2617.pdf.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2019d] Ministerio del Medio Ambiente (2019d). Decreto supremo n° 6: Establece plan de prevención y de descontaminación atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1140121&f=2019-12-17>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2019e] Ministerio del Medio Ambiente (2019e). Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales. Technical report, Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile. <https://acortar.link/retc-guia-metodologica>.

- [Ministerio del Medio Ambiente, 2022a] Ministerio del Medio Ambiente (2022a). Decreto 12: Establece norma primaria de calidad del aire para material particulado respirable MP10. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1176988>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2022b] Ministerio del Medio Ambiente (2022b). Ley 21455: Ley marco de cambio climático. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2023a] Ministerio del Medio Ambiente (2023a). Decreto 40: Establece norma primaria de calidad del aire para dióxido de nitrógeno (NO₂). Diario Oficial de la República de Chile. CVE 2546616. <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2024/09/23/43955/01/2546616.pdf>.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2023b] Ministerio del Medio Ambiente (2023b). Presentación comité operativo ampliado: Sesión n°4/2023 [presentación]. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2023/proyectos/d8c_Presentacion.pdf.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2024a] Ministerio del Medio Ambiente (2024a). Anteproyecto de la norma primaria de calidad del aire para material particulado fino MP_{2,5}. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2024/proyectos/_99__Res_0308.pdf.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2024b] Ministerio del Medio Ambiente (2024b). Documento del inventario nacional de gases de efecto invernadero: Serie 1990-2022. Technical report, Ministerio del Medio Ambiente. https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/2024_DIN_CL.pdf.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2025] Ministerio del Medio Ambiente (2025). Anteproyecto de la norma primaria de calidad del aire para dióxido de azufre SO₂. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2025/proyectos/69_DCN_SO2_folio_444-446.pdf.
- [Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998] Ministerio Secretaría General de la Presidencia (1998). Decreto 59: Establece norma primaria de calidad de aire para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=99434>.
- [Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2003] Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2003). Decreto 114: Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de nitrógeno (no₂). https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2021/proyectos/28._31052021_DTO-114_06-MAR-2003_Norma_vigente_folio_406-408.pdf.
- [Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2010] Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2010). Decreto 70: Establece plan de descontaminación atmosférico para la ciudad de Tocopilla y su zona circundante. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1017753&f=2010-10-12&p=>.

- [Naciones Unidas, 1992] Naciones Unidas (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.
- [Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, 2025] Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (2025). Emisiones al aire de fuentes puntuales 2023. [Archivo Excel]. <https://datosretc.mma.gob.cl/dataset/emisiones-al-aire-de-fuente-puntuales>. Consultado el 12 de diciembre de 2025.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2019] Superintendencia del Medio Ambiente (2019). Informe de fiscalización ambiental: Inspección ambiental Central Termoeléctrica Angamos (CTA). Technical Report DFZ-2019-630-II-RCA, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104207724>.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023a] Superintendencia del Medio Ambiente (2023a). Informe de fiscalización ambiental: Plan de descontaminación para la ciudad de Tocopilla y su zona circundante. Technical Report DFZ-2023-1930-II-PPDA, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104337244>.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023b] Superintendencia del Medio Ambiente (2023b). Informe técnico: Cumplimiento de norma de calidad del aire por MP2,5 y MP10, Red de Calidad del Aire del Gran Concepción, Región del Biobío. Technical Report DFZ-2023-2041-VIII-NC, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104343228>.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2023c] Superintendencia del Medio Ambiente (2023c). Informe técnico de fiscalización ambiental: Examen de información - complejo termoeléctrico ventanas. Technical Report DFZ-2023-1688-V-PPDA, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104348716>.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024a] Superintendencia del Medio Ambiente (2024a). Informe de fiscalización ambiental: Plan de prevención de contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante. Technical Report DFZ-2024-2364-III-PPDA, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104376059>.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024b] Superintendencia del Medio Ambiente (2024b). Informe técnico: Cumplimiento de normas de calidad del aire por MP10. evaluación de información Redes de Calidad del Aire de Tocopilla, Región de Antofagasta. Technical Report DFZ-2024-31-II-NC, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104363791>.
- [Superintendencia del Medio Ambiente, 2024c] Superintendencia del Medio Ambiente (2024c). Informe técnico: Cumplimiento de normas de calidad del aire por MP10, MP2,5, Plomo, MPS, NO2 y SO2. evaluación de información Redes de Calidad del Aire de Huasco, Región de Atacama. Technical Re-

port DFZ-2024-24-III-NC, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104380255>.

[Superintendencia del Medio Ambiente, 2024d] Superintendencia del Medio Ambiente (2024d). Informe técnico: Cumplimiento de normas de calidad del aire por MP10, NO₂ y CO. evaluación de información Redes de Calidad del Aire de Mejillones, Región de Antofagasta. Technical Report DFZ-2024-1789-II-NC, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104376781>.

[Superintendencia del Medio Ambiente, 2024e] Superintendencia del Medio Ambiente (2024e). Informe técnico: Cumplimiento de normas de calidad del aire por MP_{2,5}, MP10, Plomo y SO₂. evaluación de información Redes de Calidad del Aire Puchuncaví, Quintero y Concón, Región de Valparaíso. Technical Report DFZ-2024-324-V-NC, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104363242>.

[Superintendencia del Medio Ambiente, 2025] Superintendencia del Medio Ambiente (2025). Examen de información: Informe consolidado de emisiones del establecimiento afecto al impuesto del artículo 8° de la Ley N° 20.780, modificado por la Ley N° 21.210, año 2024. Technical Report DFZ-2025-2027-VIII-IVERDE, Superintendencia del Medio Ambiente. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104406396>.

[Suárez-Ruiz and Ward, 2008] Suárez-Ruiz, I. and Ward, C. R. (2008). Chapter 4 - coal combustion. In Suárez-Ruiz, I. and Crelling, J. C., editors, *Applied Coal Petrology*, pages 85–117. Elsevier, Burlington. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045051-3.00004-X>.

[U.S. Environmental Protection Agency, 1998] U.S. Environmental Protection Agency (1998). Section 1.1: Bituminous and subbituminous coal combustion. Ap-42, fifth edition, volume i, U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/1.1_bituminous_and_subbituminous_coal_combustion.pdf.

[U.S. Environmental Protection Agency, 2002] U.S. Environmental Protection Agency (2002). EPA air pollution control cost manual. Epa/452/b-02-001, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/c_allchs.pdf.

[Vivanco, 2022] Vivanco, E. (2022). Zonas de sacrificio en Chile: Quintero-Puchuncaví, Coronel, Mejillones, Tocopilla y Huasco. Componente industrial y salud de la población. Asesoría técnica parlamentaria, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33401/1/BCN_Zonas_de_sacrificio_en_Chile_2022_FINAL.pdf.

- [Viviani et al., 2021] Viviani, P., Leiva, C., Ojeda, M. J., Ahumada, E., and Cortés, S. (2021). Daños de salud respiratoria en comunas expuestas a centrales termoeléctricas a carbón en el norte de Chile: análisis de datos secundarios. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 37(1):17–25. <https://revchilenfermrespir.cl/index.php/RChER/article/view/971>.
- [World Health Organization, 2021] World Health Organization (2021). Who global air quality guidelines. Particulate matter (pm_{2.5} and pm₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Technical report, World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. https://aqmx.org/sites/default/files/resources/WHO2021_AQG.pdf.
- [Wu, 2002] Wu, Z. (2002). NO_x control for pulverised coal fired power stations. Informe Técnico CCC/69, IEA Clean Coal Centre, Londres, Reino Unido. https://www.sustainable-carbon.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/reports/pollutioncontroltechnologies/nox-controls-for-pulverised-coal-fired-power-stations--ccc-69.pdf.

Anexo A

Factores de emisión

Tabla A.1: Factores de emisión de gases de efecto invernadero, en kg del gas respectivo por kg de carbón, extraídos a partir del informe IPCC 2006-2019 [Gómez et al., 2006].

ccf8	Configuración	Nivel actividad	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
10100201	PC, wet bottom, wall-firedf, bituminous, Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	2816,5	87,9	44,0
10100202	PC, dry bottom, wall-firedf, bituminous Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	2816,5	87,9	44,0
10100211	PC, dry bottom, tangentially fired, bituminous, Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	2816,5	87,9	44,0
10100212	PC, dry bottom, tangentially fired, bituminous, Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	2816,5	87,9	44,0
10100222	PC, dry bottom, wall-firedf, sub-bituminous Pre-NSPSg	carbón subbituminoso combustionado	2816,5	87,9	44,0
10100238	Circulating fluidized bed	carbón subbituminoso combustionado	2816,5	87,9	44,0

Tabla A.2: Factores de emisión de contaminantes, en kg de contaminante respectivo por tonelada de carbón, extraídos a partir del informe AP-42 [U.S. Environmental Protection Agency, 1998].

ccf8	Configuración	Nivel actividad	NO _x	SO ₂	MP	MP ₁₀	MP _{2,5}
10100201	PC, wet bottom, wall-firedf, bituminous, Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	14,1	7,9	82,6	30,7	17,5
10100202	PC, dry bottom, wall-firedf, bituminous Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	10,0	8,6	117,9	27,1	7,1
10100211	PC, dry bottom, tangentially fired, bituminous, Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	6,4	8,6	117,9	27,1	7,1
10100212	PC, dry bottom, tangentially fired, bituminous, Pre-NSPSg	carbón bituminoso combustionado	6,8	8,6	117,9	27,1	7,1
10100222	PC, dry bottom, wall-firedf, sub-bituminous Pre-NSPSg	carbón subbituminoso combustionado	5,4	7,9	117,9	27,1	7,1
10100238*	Circulating fluidized bed	carbón subbituminoso combustionado	4,8	N/A	9,9	7,3	0,6

*La tecnología presenta emisiones de SO₂ como material particulado, factores de emisión obtenidos de guía metodología del RETC 2019 [Ministerio del Medio Ambiente, 2019e].

Anexo B

Sistemas de abatimiento y sus eficiencias

Tabla B.1: Sistemas de abatimiento por entidad.

Unidad	Inicio de operaciones	Abatimiento de NO _x	Abatimiento de SO ₂	Abatimiento de MP
Andina-CTA	2011	No aplica	Caldera lecho fluidizado con inyección de caliza	Precipitador electrostático*
Hornitos-CTH	2011	No aplica	Caldera lecho fluidizado con inyección de caliza	Precipitador electrostático*
Angamos-ANG1	2011	Quemadores low NO _x **	FGD, semi-seco*	Filtro de mangas*
Angamos-ANG2	2011	Quemadores low NO _x **	FGD, semi-seco*	Filtro de mangas*
Bocamina-U1	1969	-	FGD*	Filtro de mangas*
Bocamina-U2	2012	-	FGD*	Filtro de mangas*
Cochrane-CCR1	2016	SCR	FGD, seco*	Filtro de mangas*
Cochrane-CCR2	2016	SCR	FGD, seco*	Filtro de mangas*

*Sistemas de abatimiento presentes en el RETC.

**Fuente: Informe de fiscalización ambiental, SMA, 2019.

Tabla B.2: [Continuación tabla B.1.] Sistemas de abatimiento por entidad.

Unidad	Inicio de operaciones	Abatimiento de NO _x	Abatimiento de SO ₂	Abatimiento de MP
Guacolda-U1	1995	SCR	FGD, seco*	Filtro de mangas*
Guacolda-U2	1996	-	FGD, seco*	Filtro de mangas*
Guacolda-U3	2009	Quemadores low NO _x	FGD, húmedo*	Precipitador electrostático*
Guacolda-U4	2010	SCR	FGD, seco*	Filtro de mangas*
Guacolda-U5	2015	SCR	FGD, húmedo*	Precipitador electrostático*
IEM1	2019	Quemadores low NO _x	FGD, húmedo*	Filtro de mangas 2x50%***
Mejillones-CTM1	1996	Quemadores low NO _x	FGD, seco*	Filtro de mangas*
Mejillones-CTM2	1998	Quemadores low NO _x	FGD, seco*	Filtro de mangas*
Norgener-NT01	1995	Quemadores low NO _x **	FGD*	Filtro de mangas*
Norgener-NT02	1997	Quemadores low NO _x **	FGD*	Filtro de mangas*
Santa María	2012	Quemadores low NO _x	Scrubber - Desulfuración de gases*	Precipitador electrostático*
Tarapacá	1998	-	FGD*	Filtro de mangas*

*Sistemas de abatimiento presentes en el RETC.

**Fuente: Informe de determinación de parámetros de los procesos de partida y detención de las unidades Nueva Topilla, AES Gener.

Tabla B.3: [Continuación tabla B.2.] Sistemas de abatimiento por entidad.

Unidad	Inicio de operaciones	Abatimiento de NO _x	Abatimiento de SO ₂	Abatimiento de MP
Ventanas 1	1964	Quemadores low NO _x	CDS FGD*	Filtro de mangas*
Ventanas 2	1977	Quemadores low NO _x	SW FGD húmedo*	Filtro de mangas*
Nueva Ventanas	2010	Quemadores low NO _x	SDA FGD, semi-seco*	Filtro de mangas*
Campiche	2013	Quemadores low NO _x	SDA FGD, semi-seco*	Filtro de mangas*
Tocopilla-U12	1983	Quemadores low NO _x **	FGD, seco	Filtro de mangas 2x50%**
Tocopilla-U13	1985	Quemadores low NO _x **	FGD, seco	Filtro de mangas 2x50%**
Tocopilla-U14	1987	Quemadores low NO _x **	FGD, seco	Filtro de mangas 2x50%**
Tocopilla-U15	1990	Quemadores low NO _x **	FGD, seco	Filtro de mangas 2x50%**

*Sistemas de abatimiento presentes en el RETC.

**Fuente: Memoria anual 2015, Engie.

Tabla B.4: Eficiencias de sistema de abatimiento de NO_x consideradas versus obtenidas por transparencia en RETC.

Generadora	Eficiencia NO_x	Eficiencia NO_x RETC
Andina	0,0	0,0
Angamos	0,0	0,0
Bocamina	50,0	0,0
Bocamina II	50,0	0,0
Campiche	50,0	0,0
Cochrane	50,0	0,0
Guacolda 1	89,9	85,0
Guacolda 2	83,0	0,0
Guacolda 3	30,0	0,0
Guacolda 4	83,0	85,0
Guacolda 5	83,3	85,0
Hornitos	0,0	0,0
IEM	50,0	0,0
Mejillones	50,0	0,0
Norgener	50,0	0,0
Nueva Ventanas	50,0	0,0
Santa María	50,0	0,0
Tarapacá	89,9	0,0
Tocopilla	50,0	0,0
Ventanas 1	50,0	0,0
Ventanas 2	45,0	0,0

Tabla B.5: Eficiencias de sistema de abatimiento de SO₂ consideradas versus obtenidas por transparencia en RETC

Generadora	Eficiencia SO₂	Eficiencia SO₂ RETC
Andina	100	N/A
Angamos	89	94,95
Bocamina	90	94,95
Bocamina II	98	94,95
Campiche	75	94,95
Cochrane	91	94,95
Guacolda 1	91	94,95
Guacolda 2	91	94,95
Guacolda 3	91	94,95
Guacolda 4	88	94,95
Guacolda 5	91	94,95
Hornitos	100	94,95
IEM	90	94,95
Mejillones	76	94,95
Norgener	95	94,95
Nueva Ventanas	75	94,95
Santa María	78	94,95
Tarapacá	90	94,95
Tocopilla	88	94,95
Ventanas 1	90	94,95
Ventanas 2	80	94,95

Tabla B.6: Eficiencias de sistema de abatimiento de MP consideradas versus obtenidas por transparencia en RETC

Generadora	Eficiencia MP	Eficiencia MP RETC
Andina	99,90	99,5
Angamos	99,99	97,5
Bocamina	99,00	97,5
Bocamina II	99,00	97,5
Campiche	99,99	97,5
Cochrane	99,99	97,5
Guacolda 1	99,85	97,5
Guacolda 2	99,85	97,5
Guacolda 3	99,85	99,5
Guacolda 4	99,85	97,5
Guacolda 5	99,85	99,5
Hornitos	99,90	99,5
IEM	99,00	97,5
Mejillones	99,95	97,5
Norgener	99,00	97,5
Nueva Ventanas	99,99	97,5
Santa María	99,70	99,5
Tarapacá	99,60	97,5
Tocopilla	99,95	0,0
Ventanas 1	99,90	97,5
Ventanas 2	99,90	97,5

Anexo C

Detalle de estimación de emisiones

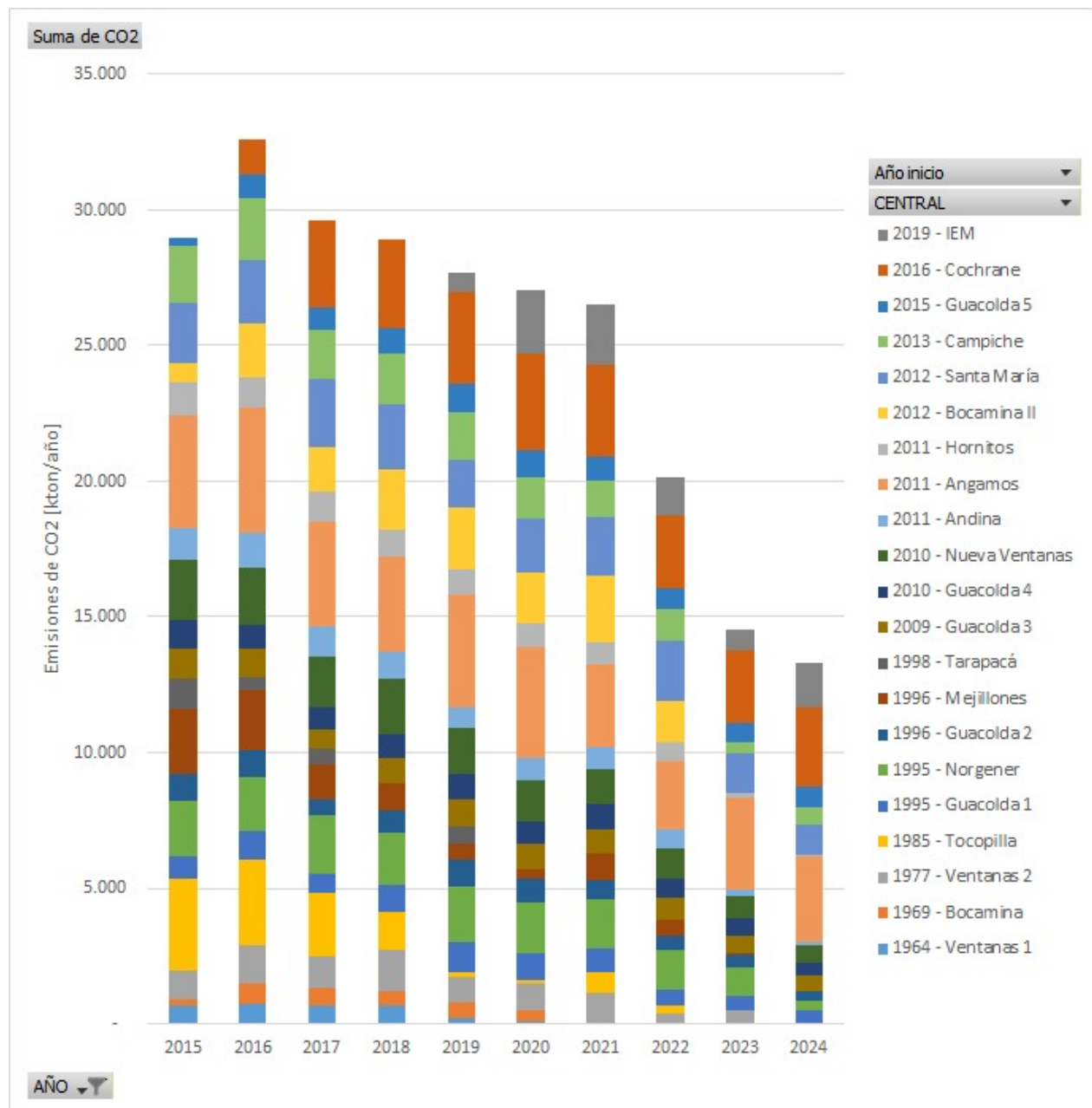


Figura C.1: Detalle de resultados del calculo de emisiones de CO₂ en toneladas anuales por entidad.
Elaboración propia.

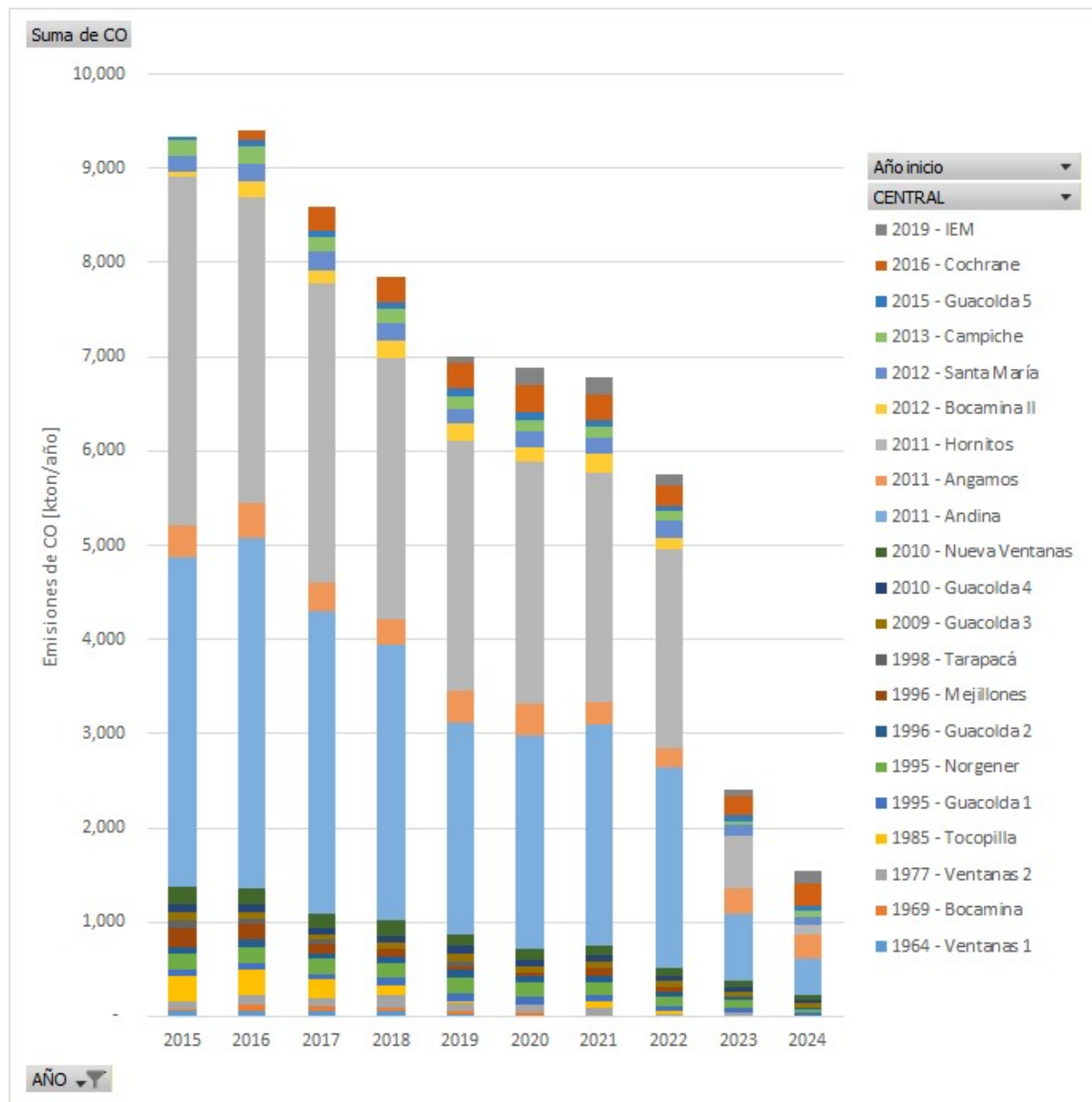


Figura C.2: Detalle de resultados del calculo de emisiones de CO en toneladas anuales por entidad.
Elaboración propia.

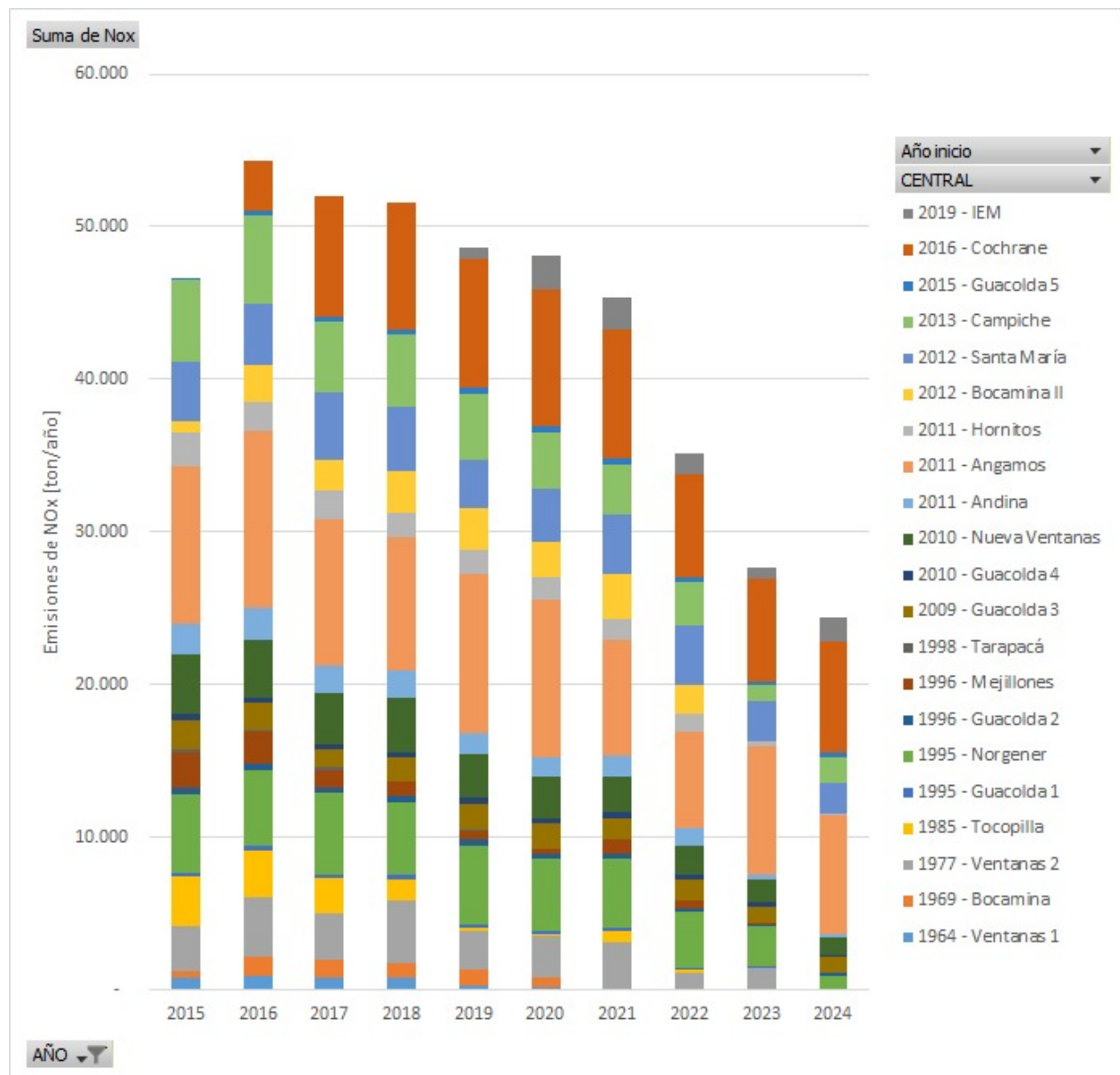


Figura C.3: Detalle de resultados del calculo de emisiones de NO_x en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.

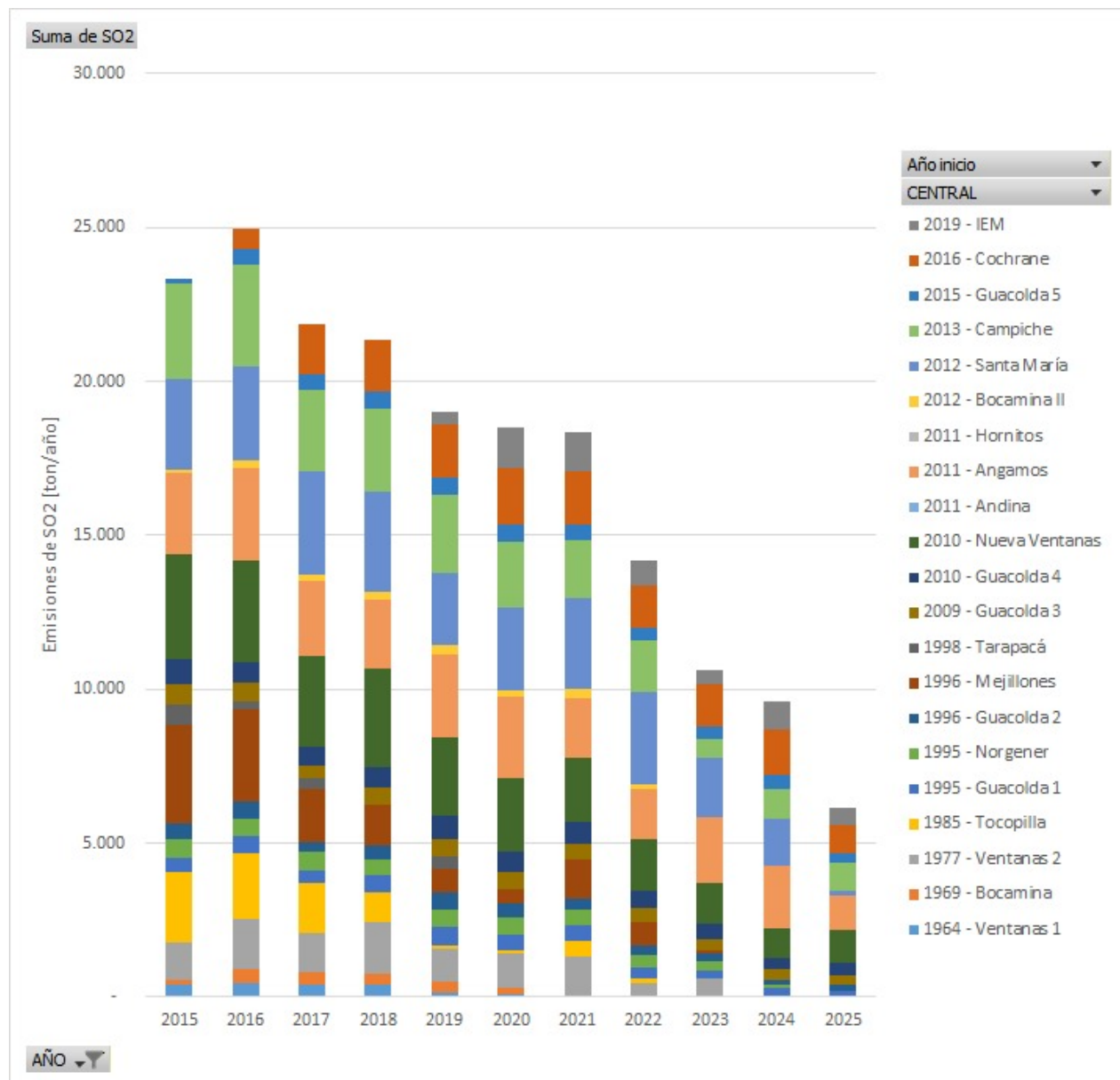


Figura C.4: Detalle de resultados del calculo de emisiones de SO₂ en toneladas anuales por entidad.
Elaboración propia.

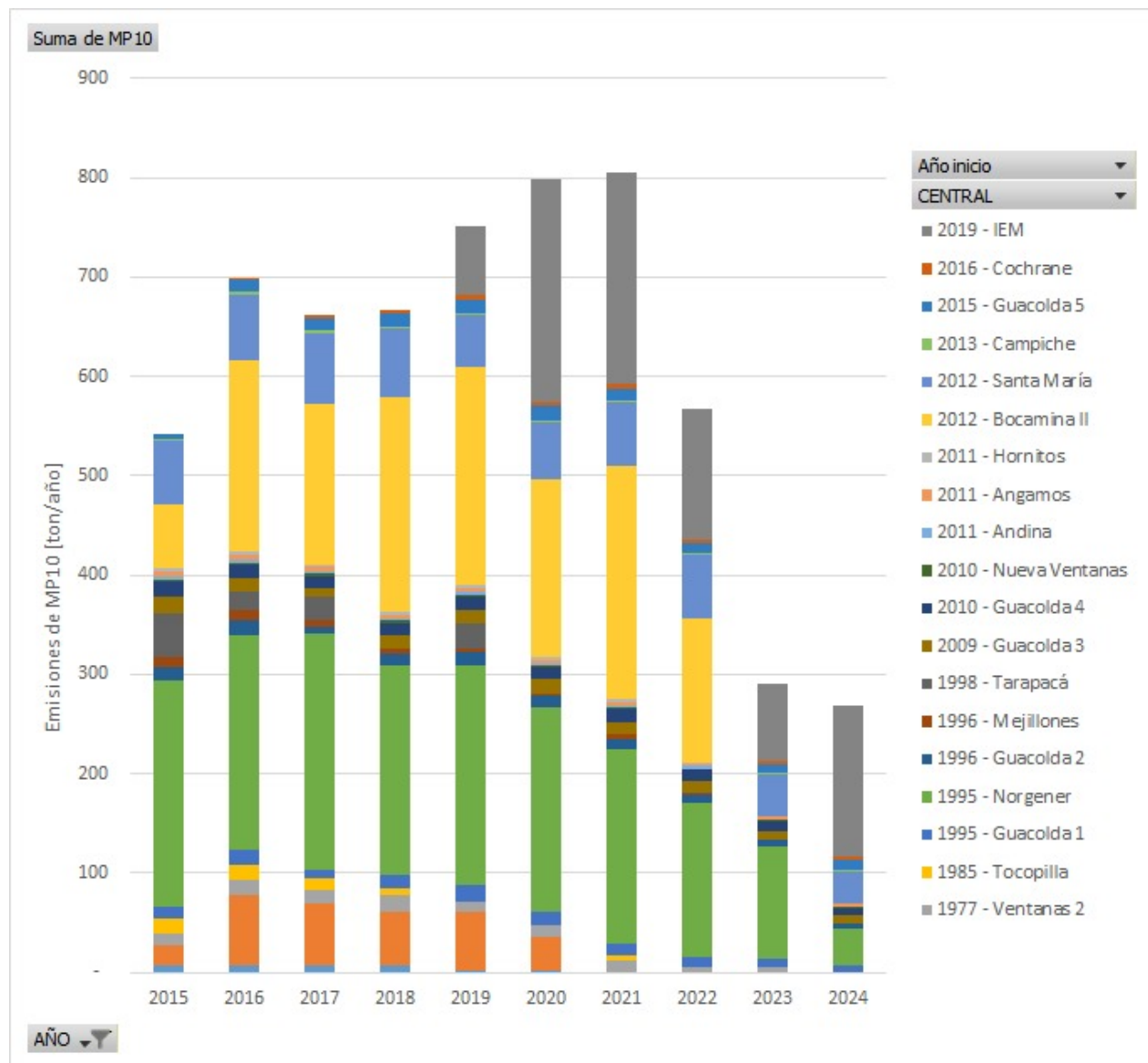


Figura C.5: Detalle de resultados del calculo de emisiones de MP_{10} en toneladas anuales por entidad.
Elaboración propia.

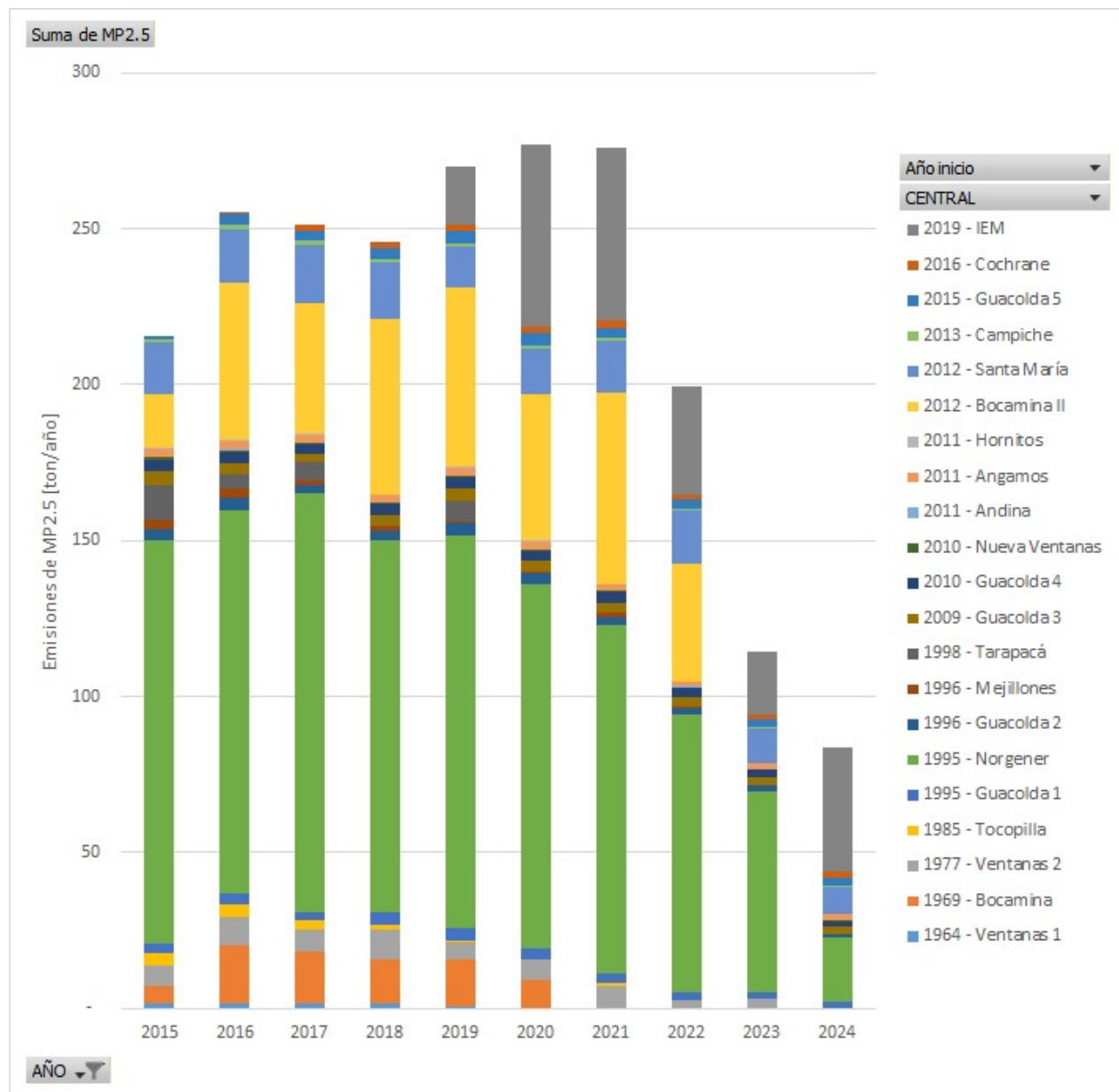


Figura C.6: Detalle de resultados del calculo de emisiones de MP_{2,5} en toneladas anuales por entidad. Elaboración propia.

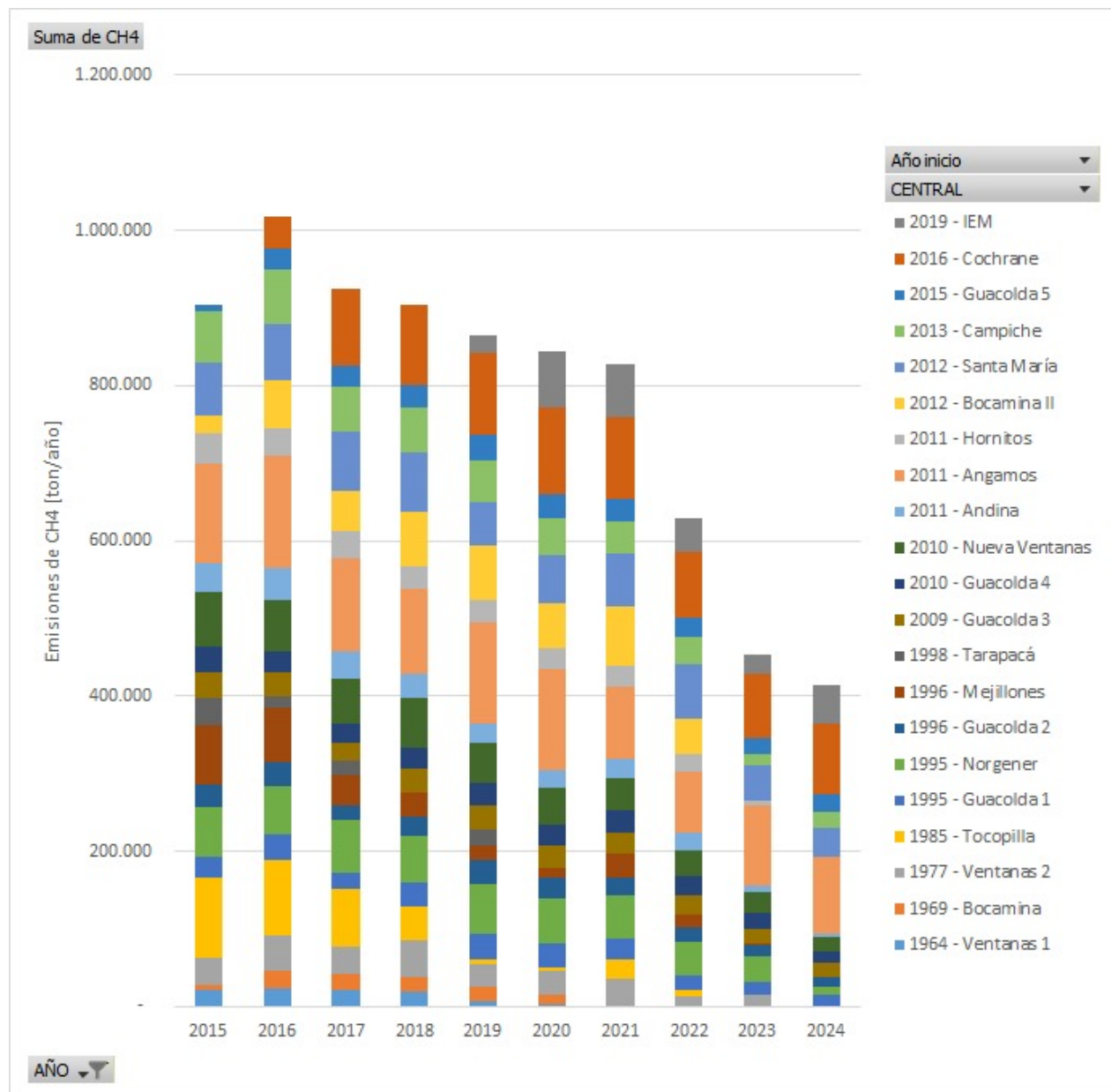


Figura C.7: Detalle de resultados del calculo de emisiones de CH₄ en toneladas anuales por entidad.
Elaboración propia.

Anexo D

Análisis de centros de salud complementario

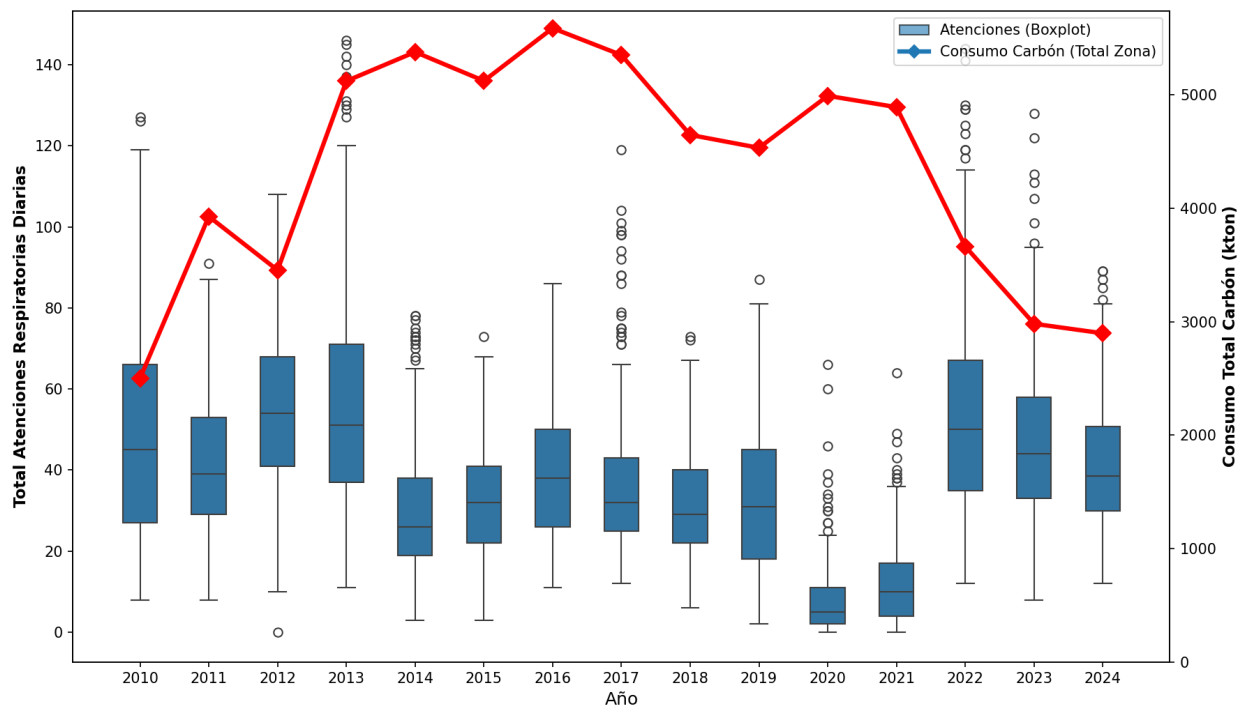


Figura D.1: Comparación de a atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en la macrozona 03, aislando Antofagasta, ID 03-102, 03-104, 03-943, 03-944, 03-945.

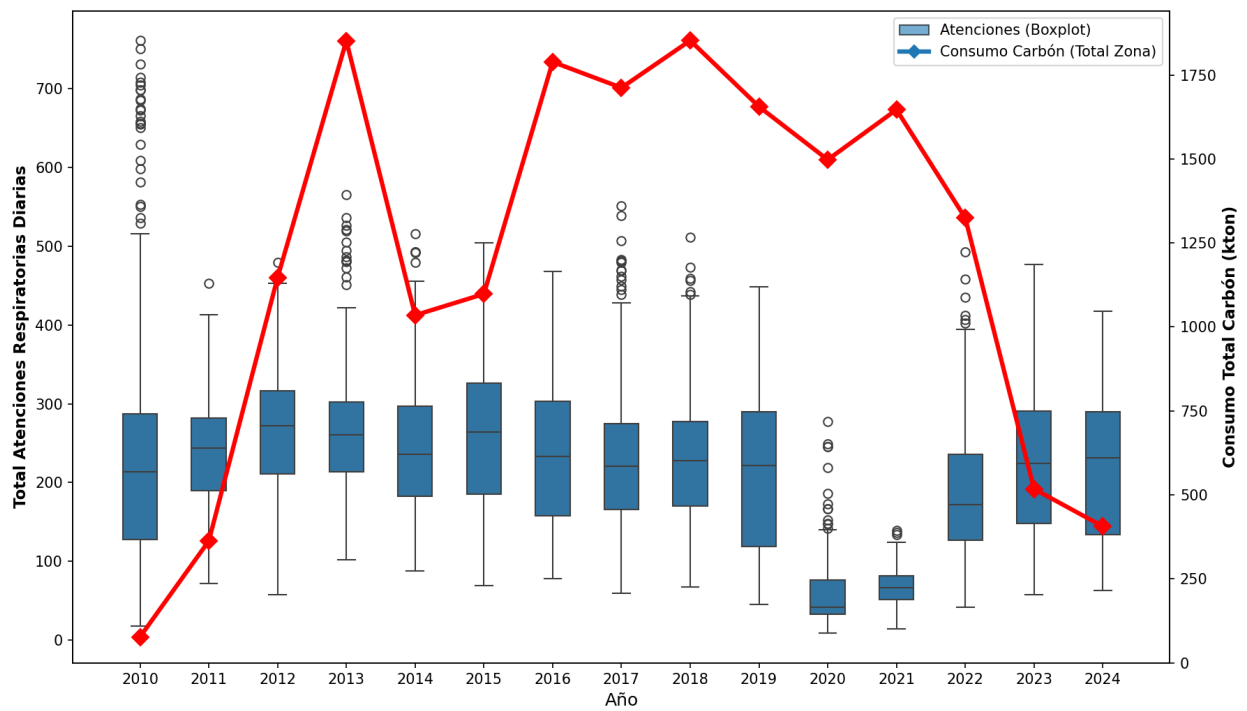


Figura D.2: Comparación de a atenciones de urgencia en enfermedades respiratorias vs consumo de carbón en recintos a 10 km de las carboneras, ID 18-105, 18-106, 18-812, 18-813, 18-977.