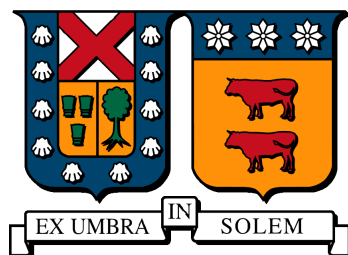


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO-CHILE**



**Modelo de alta resolución espacial y temporal  
para la estimación de emisiones de gases efecto  
invernadero y forzantes climáticos de vida corta  
generados por el sector transporte en Chile**

**David Alejandro Bevilacqua Donoso**

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS  
DE INGENIERÍA MECÁNICA Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: PhD. Mauricio Osses A.**  
**PROFESOR CORREFERENTE: PhD. Olivier Skurtys**  
**PROFESOR EXTERNO: PhD. Nicolás Huneus**

**junio 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:** Modelo de alta resolución espacial y temporal para la estimación de emisiones de gases efecto invernadero y forzantes climáticos de vida corta generados por el sector transporte en Chile

**Nombre del candidato(a):** David Alejandro Bevilacqua Donoso

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil Mecánica / Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica

**Campus:** Campus SJ **Departamento:** DIMEC

### 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:** 06/08/2026

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 06/08/2026

**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.*

# Glosario de términos

| Sigla           | Descripción                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| AMDT            | Average Medium Daily Traffic o Tráfico medio diario anual.     |
| BC              | Carbón negro o black carbon.                                   |
| BNE             | Balance Nacional de Energía.                                   |
| BUS             | Buses.                                                         |
| CAM             | Camiones.                                                      |
| CAMP            | Camiones Pesados.                                              |
| CAMS            | Copernicus Atmosphere Monitoring Service.                      |
| CEDS            | Community Emissions Data System.                               |
| CH <sub>4</sub> | Metano.                                                        |
| CNE             | Comisión Nacional de Energía.                                  |
| CO              | Monóxido de Carbono.                                           |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de Carbono.                                            |
| CONAMA          | Comisión Nacional del Medio Ambiente.                          |
| COP             | Contaminantes Orgánicos Persistentes.                          |
| COPERT          | Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport. |
| DIRPLAN         | Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas.    |
| EDGAR           | Emissions Database for Global Atmospheric Research.            |
| ENAP            | Empresa Nacional del Petróleo.                                 |
| EPA             | U.S. Environmental Protection Agency.                          |
| GEI             | Gases de Efecto Invernadero.                                   |
| HAP             | Hidrocarburos aromáticos policíclicos.                         |

|                   |                                                                                                                |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HC                | Hidrocarburos.                                                                                                 |
| HTAP              | Hemispheric Transport of Air Pollution.                                                                        |
| INEMA             | Inventario Nacional de Emisiones Atmosféricas.                                                                 |
| IPCC              | Intergovernmental Panel on Climate Change.                                                                     |
| IVE               | International Vehicle Emissions.                                                                               |
| LAC               | Latinoamérica y el Caribe.                                                                                     |
| LAT               | Laboratory of Applied Thermodynamics.                                                                          |
| MMA               | Ministerio de Medioambiente.                                                                                   |
| MOT               | Motocicletas.                                                                                                  |
| MOVES             | Motor Vehicle Emission Simulator.                                                                              |
| MTT               | Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.                                                                 |
| NA                | Nivel de Actividad.                                                                                            |
| NO <sub>x</sub>   | Óxidos de Nitrógeno.                                                                                           |
| PM                | Material Particulado.                                                                                          |
| PM <sub>10</sub>  | Material Particulado 10 micrómetros.                                                                           |
| PM <sub>2.5</sub> | Material Particulado 2.5 micrómetros.                                                                          |
| PTI               | Política de Transporte Inter Urbano.                                                                           |
| RAQM              | Regional Air Quality Models.                                                                                   |
| SEC               | Superintendencia de Electricidad y Combustible.                                                                |
| SECTRA            | Secretaría de Planificación de Transporte.                                                                     |
| STEP              | Análisis y Desarrollo de una Metodología de Estimación de Consumos Energéticos y Emisiones para el Transporte. |
| TAX               | Taxis.                                                                                                         |
| UCR               | University of California at Riverside.                                                                         |
| UNFCCC            | United Nations Framework Convention on Climate Change.                                                         |

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| VKT | Vehicle Kilometer Traveled.      |
| VLC | Vehículos Livianos Comerciales.  |
| VLP | Vehículos Livianos de Pasajeros. |
| VOC | Compuestos orgánicos volátiles.  |
| VSP | Vehicle Specific Power.          |

# Resumen

El sector transporte constituye el motor físico de la economía chilena, pero simultáneamente se alza como una de las mayores fuentes de gases de efecto invernadero y contaminantes locales. Abordar su impacto ambiental mediante inventarios macroscópicos estáticos suele invisibilizar las profundas asimetrías territoriales y los momentos críticos de exposición humana. Para quebrar y dejar atrás esta limitación, el presente trabajo de tesis desarrolla un modelo de estimación y desagregación espacio-temporal de alta resolución para el transporte multimodal (terrestre, aéreo y marítimo) a nivel nacional, junto con la proyección de emisiones a 2050 bajo distintos escenarios de mitigación para cada modo de transporte. La investigación se sustentó en un enfoque *bottom-up*, procesando volúmenes masivos de datos primarios, incluyendo desde la interceptación de telemetría satelital (AIS) para trazar el ruteo marítimo, pasando por la separación estequiométrica de las fases LTO y CCD en la aviación comercial y las fases de puerto, maniobra, fondeo a la gira y crucero para el transporte marítimo, hasta la modelación del flujo vehicular sobre la compleja red vial del país.

Los resultados del escenario base revelaron dinámicas territoriales clarificadoras, ya que mientras la huella de carbono del parque terrestre copia directamente a la densidad demográfica de la Región Metropolitana, los vectores críticos para la salud pública, como los óxidos de nitrógeno y el material particulado, desplazan sus puntos de máxima concentración hacia las rutas interurbanas de tracción pesada en zonas industriales y mineras. En el ámbito marítimo, la etapa de estadía en muelle llamada Puerto (*ho-telling*) demostró ser la principal causante de la saturación atmosférica en las bahías, registrando fluctuaciones estacionales fuertemente amarradas a los ciclos logísticos de exportación. Por su parte, la aviación expuso un claro pico operativo estival, inyectando precursores fotoquímicos precisamente cuando las condiciones meteorológicas favorecen la formación de ozono. Toda esta planimetría se estructuró de manera nativa en formatos estandarizados (GeoTIFF, NetCDF), quedando lista para acoplarse con simuladores avanzados de calidad del aire.

Finalmente, la prospectiva econométrica al año 2050 demostró que el crecimiento inercial de la demanda empujaría la matriz de movilidad hacia niveles de emisión de-rechamente insostenibles. Al someter el modelo a diversos escenarios de mitigación, se comprobó de forma empírica que aislar medidas tecnológicas resulta ineficaz. No obstante, una combinación agresiva de recambio de flotas, optimización operativa y la

penetración de nuevos vectores energéticos como los Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF), evaluados bajo el rigor del análisis de ciclo de vida completo, posee la musculatura suficiente para quebrar la curva de emisiones e incluso reducir a la mitad la huella climática sectorial. En definitiva, esta tesis aporta un motor de simulación paramétrico y dinámico, entregando la certidumbre técnica indispensable para diseñar políticas de descarbonización verdaderamente quirúrgicas frente a la urgencia del cambio climático.

# Abstract

The transport sector constitutes the physical engine of the Chilean economy, but simultaneously stands out as one of the largest sources of greenhouse gases and local pollutants. Addressing its environmental impact through static macroscopic inventories often conceals deep territorial asymmetries and critical moments of human exposure. To break through and move past this limitation, this thesis develops a high-resolution spatio-temporal estimation and disaggregation model for national multimodal transport (land, air, and maritime), along with the projection of emissions to 2050 under different mitigation scenarios for each transport mode. The research was based on a *bottom-up* approach, processing massive volumes of primary data, ranging from the interception of satellite telemetry (AIS) to trace maritime routing, through the stoichiometric separation of LTO and CCD phases in commercial aviation and the port, maneuvering, anchorage, and cruise phases for maritime transport, to the modeling of vehicular flow over the country's complex road network.

The baseline scenario results revealed clarifying territorial dynamics; while the carbon footprint of the land transport fleet directly mirrors the population density of the Metropolitan Region, critical public health vectors, such as nitrogen oxides and particulate matter, shift their points of maximum concentration toward heavy-duty interurban routes in industrial and mining zones. In the maritime sector, the berth stay stage known as Port (*hotelling*) proved to be the primary cause of atmospheric saturation in bays, showing seasonal fluctuations tightly bound to export logistics cycles. On the other hand, aviation exhibited a clear summer operational peak, injecting photochemical precursors precisely when meteorological conditions favor ozone formation. All this planimetry was natively structured into standardized formats (GeoTIFF, NetCDF), leaving it ready to be coupled with advanced air quality simulators.

Finally, the econometric forecasting to the year 2050 demonstrated that the inertial growth of demand would push the mobility matrix toward downright unsustainable emission levels. By subjecting the model to various mitigation scenarios, it was empirically proven that isolating technological measures is ineffective. However, an aggressive combination of fleet renewal, operational optimization, and the penetration of new energy vectors such as Sustainable Aviation Fuels (SAF), evaluated under the rigor of a comprehensive life cycle assessment, possesses sufficient strength to break the emissions curve and even halve the sector's climate footprint. Ultimately, this thesis provides a

parametric and dynamic simulation engine, delivering the essential technical certainty to design truly surgical decarbonization policies against the urgency of climate change.



# Agradecimientos

Quisiera agradecer a toda la gente que confió, creyó en mi, y que me ayudó de alguna u otra forma a lo largo de este periodo. Me gustaría agradecer a mi tío Francisco Bevilacqua, por toda su ayuda especialmente los primeros años de universidad. También agradecer a mi pareja, Camila Mora, por su apoyo y compañía en los momentos difíciles que me tocó vivir.

Me gustaría agradecer en especial a mis padres: a mi madre, Patricia Donoso Campos, por su apoyo en todo momento y por hacer todo lo posible por darme el tiempo y espacio necesario para poder realizar esta tesis, y a mi padre, Gerardo Bevilacqua Roa, por todo su apoyo y estoy seguro que desde donde sea que esté me manda mucha fuerza y fortaleza. Sin ellos esto no hubiera sido posible.

También quiero agradecer a mi profesor guía, Mauricio Osses, por su guía, apoyo, comprensión y empatía en todo momento.

Se agradece igualmente el apoyo y respaldo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), albergado en la Universidad de Chile y financiado a través del programa de Actividades de Interés Nacional (AIN), así como el apoyo del proyecto Fondecyt Regular No. 1241477, que han permitido fortalecer la investigación en modelación y evaluación de emisiones del sector transporte en Chile.

Por último, se agradece a la Universidad Técnica Federico Santa María por las siguientes becas:

- Beca Arancel de Postgrado.
- Beca de Alimentación.
- Beca Programa de Iniciación a la Investigación Científica (PIIC).
- Beca Asistencia a Congreso.

# Introducción

El sector transporte constituye el motor físico de la economía nacional. La conectividad territorial, el flujo de pasajeros y las cadenas de suministro de comercio exterior dependen de una inmensa red logística que mantiene al país en movimiento. Sin embargo, se sabe que esta misma tracción acarrea un costo ambiental que ya no admite postergaciones. La quema masiva de combustibles fósiles en carreteras, cielos y océanos sitúa al transporte como uno de los principales responsables del inventario nacional de gases de efecto invernadero y de las descargas de contaminantes locales que degradan severamente la calidad del aire en nuestras ciudades y costas.

Históricamente, la contabilidad de estas externalidades se ha manejado desde una perspectiva agregada. Los inventarios tradicionales, contruidos muchas veces bajo enfoques *top-down*, que a lo largo del presente documento se explicará en detalle en que consisten, reportan las emisiones totales a nivel país o regional asumiendo, por defecto, distribuciones geométricas y cronológicas planas. La realidad, por el contrario, es sumamente dinámica y asimétrica. Un buque mercante por ejemplo opera sus generadores auxiliares durante una estadía prolongada en la bahía de Quintero, un avión comercial por otro lado en fase de ascenso sobre el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, o la congestión de camiones en las rutas mineras de Antofagasta, todas estas situaciones generan presiones atmosféricas muy distintas. Los contaminantes se inyectan en coordenadas geográficas específicas y responden a distintas fluctuaciones temporales, incluyendo escalas horarias, semanales y estacionales que los modelos macroscópicos suelen ignorar.

Bajo esta premisa nace el presente trabajo de investigación. El propósito central es desarrollar, calibrar y validar un modelo de estimación y desagregación espacio-temporal de alta resolución para el transporte multimodal en Chile, abarcando de manera integral los sectores terrestre, aéreo y marítimo.

Para quebrar la inercia de los promedios anuales, este estudio adopta una metodología rigurosa de tipo *bottom-up* con un nivel de detalle Tier 3. Esto implicó el procesamiento de volúmenes masivos de datos primarios, desde la interceptación y ruteo de telemetría satelital (AIS) para rastrear el cabotaje en los canales patagónicos, la separación del consumo de turbinas de aviación entre las fases LTO (aterrizaje y despegue) y CCD (crucero), la modelación de los perfiles de flujo vehicular a lo largo de la red vial, hasta la proyección de estas emisiones a futuro simulando y cuantificando

diversos escenarios de mitigación. Toda esta información se estructuró en bases de datos relacionales y contenedores espaciales estandarizados, transformando enormes planillas de cálculo en mapas de calor rasterizados y curvas temporales dinámicas capaces de dialogar con modelos avanzados de dispersión fotoquímica.

Ahora bien, diagnosticar el escenario base con esta lupa de alta resolución resuelve una parte del problema, pero se debe tener muy presente que la infraestructura de transporte posee una vida útil prolongada y la inercia del crecimiento económico asegura que la demanda por movilidad y flete seguirá expandiéndose durante las próximas décadas. Por lo tanto, la segunda gran dimensión de esta tesis se centra justamente en eso, en proyectar todos estos inventarios sectoriales hacia el año 2050.

A través del modelamiento econométrico de la demanda, se construyen trayectorias inerciales que luego son sometidas a múltiples escenarios de mitigación. De este modo, se cuantifica matemáticamente el impacto de múltiples medidas de mitigación, incluyendo la penetración de vehículos de cero emisiones, la optimización operativa de las flotas, la adopción de nuevas matrices energéticas, tales como los Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF), etc.

En definitiva, las páginas siguientes documentan la construcción de una herramienta analítica robusta. Un sistema diseñado para dejar atrás la concepción de las emisiones como un simple número en un informe anual, transformándolas en variables vivas, georreferenciadas y proyectables. Con esto, se busca entregar un insumo técnico de primer nivel que permita a la academia y a los tomadores de decisión diseñar políticas de descontaminación verdaderamente quirúrgicas frente al urgente desafío climático del siglo XXI.

## Hipótesis

La implementación de un modelo de emisiones de alta resolución espacial y temporal considerando distintos tipos de fuentes móviles, permitirá una mejor comprensión y gestión de las emisiones del sector transporte en Chile, facilitando la identificación de focos de contaminación y evaluando de manera más precisa los impactos de las políticas de mitigación en la calidad del aire y salud de la población a nivel local.

## Objetivos

### Objetivo General

- *Desarrollar un modelo nacional de alta resolución espacial y temporal para estimar las emisiones del sector transporte en Chile, que permita evaluar con precisión el impacto de diferentes políticas de mitigación y contribuya al logro de las metas de carbono neutralidad y mejora de la calidad del aire para el año 2050.*

Para materializar el propósito central de esta investigación y asegurar que cada etapa metodológica contribuya directamente a la comprensión integral del problema, se han trazado metas sucesivas y complementarias, las cuales se expresan mediante los siguientes objetivos específicos:

- Estimar las masas de descargas de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio asociadas al sector transporte multimodal en Chile (terrestre, aéreo y marítimo) mediante una desagregación espacial de alta resolución geográfica basada en metodologías de cálculo *bottom-up* e integración de bases de datos relacionales.
- Determinar la variabilidad temporal de los inventarios mediante la estructuración de perfiles fraccionales de actividad logística y urbana acoplados con las matrices espaciales para la representación fidedigna del comportamiento real de las emisiones.
- Modelar el crecimiento inercial de la demanda de movilidad y carga hacia el año 2050 junto con el impacto cuantitativo de diversas estrategias de recambio tec-

nológico, optimización operativa y adopción de vectores energéticos alternativos sobre la ruta de descarbonización del país.

# Índice general

|                                                                                      |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Glosario de términos</b>                                                          | <b>I</b> |
| <b>1. Estado del Arte</b>                                                            | <b>1</b> |
| 1.1. Marco conceptual . . . . .                                                      | 1        |
| 1.2. Rol del transporte en el cambio climático . . . . .                             | 4        |
| 1.3. Introducción a los Inventarios de Emisiones . . . . .                           | 12       |
| 1.4. Metodologías de Estimación de Emisiones del Sector Transporte . . . . .         | 14       |
| 1.4.1. Fundamentos Metodológicos: Nivel de Actividad y Factores de Emisión . . . . . | 14       |
| 1.4.2. Enfoques Top-Down y Bottom-Up . . . . .                                       | 16       |
| 1.4.3. Transporte Terrestre . . . . .                                                | 17       |
| 1.4.4. COPERT: Estándar Europeo para la Modelación de Factores de Emisión . . . . .  | 20       |
| 1.4.5. MOVES: Modelo Norteamericano de Emisiones Vehiculares . . . . .               | 21       |
| 1.4.6. IVE: Modelo Orientado a Países en Vías de Desarrollo . . . . .                | 22       |
| 1.4.7. Guía EMEP/EEA: Referencia Internacional de Factores de Emisión . . . . .      | 23       |
| 1.4.8. Metodología enfocadas en Transporte Marítimo . . . . .                        | 24       |
| 1.4.9. Metodología enfocadas en Transporte Aéreo . . . . .                           | 25       |
| 1.5. Desagregación Espacial de Emisiones . . . . .                                   | 27       |
| 1.5.1. Variables Proxy y Datos de Sustitución . . . . .                              | 27       |
| 1.5.2. Metodologías de Desagregación Espacial . . . . .                              | 29       |
| 1.5.3. Resolución Espacial e Incertidumbre . . . . .                                 | 34       |
| 1.5.4. Experiencia en Chile . . . . .                                                | 34       |
| 1.6. Desagregación Temporal de Emisiones . . . . .                                   | 35       |
| 1.6.1. Escalas Temporales de Variabilidad . . . . .                                  | 36       |
| 1.6.2. Metodología de Perfiles Temporales . . . . .                                  | 37       |
| 1.6.3. CAMS-TEMPO: Perfiles Temporales Globales y Regionales . . . . .               | 38       |
| 1.6.4. Perfiles Temporales de EDGAR . . . . .                                        | 42       |
| 1.6.5. Variabilidad Temporal del Tráfico y Factores de Asignación . . . . .          | 43       |
| 1.7. Proyecciones de Emisiones al 2050 . . . . .                                     | 43       |
| 1.7.1. Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSP) . . . . .                        | 43       |

|           |                                                                 |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.7.2.    | Proyecciones Globales del Sector Transporte . . . . .           | 45        |
| 1.7.3.    | Proyecciones para Chile . . . . .                               | 46        |
| 1.7.4.    | Herramientas de Modelación: LEAP . . . . .                      | 49        |
| 1.7.5.    | Enfoque Avoid-Shift-Improve . . . . .                           | 50        |
| 1.7.6.    | Proyecciones para Aviación y Transporte Marítimo Internacional  | 50        |
| 1.8.      | Análisis de Incertidumbre en Inventarios de Emisiones . . . . . | 51        |
| 1.8.1.    | Fuentes de Incertidumbre . . . . .                              | 51        |
| 1.8.2.    | Metodologías de Cuantificación . . . . .                        | 52        |
| 1.9.      | Integración y Aplicaciones . . . . .                            | 52        |
| 1.9.1.    | Inventarios Integrados Multi-resolución . . . . .               | 52        |
| 1.9.2.    | Uso en Modelación de Calidad del Aire . . . . .                 | 53        |
| 1.9.3.    | Aplicaciones en Evaluación de Políticas . . . . .               | 53        |
| 1.9.4.    | Visualización y Mapas de Calor . . . . .                        | 54        |
| 1.10.     | Discusión y Perspectivas Futuras . . . . .                      | 54        |
| 1.10.1.   | Desafíos Actuales . . . . .                                     | 54        |
| 1.10.2.   | Oportunidades Emergentes . . . . .                              | 55        |
| 1.10.3.   | Necesidades de Investigación para Chile y América Latina . . .  | 55        |
| 1.11.     | Conclusiones del Estado del Arte . . . . .                      | 56        |
| <b>2.</b> | <b>Materiales y Métodos</b>                                     | <b>58</b> |
| 2.1.      | Dominio de Estudio y Alcance . . . . .                          | 59        |
| 2.2.      | Estimación de Emisiones del Transporte Terrestre . . . . .      | 62        |
| 2.2.1.    | Ecuación Fundamental de Cálculo . . . . .                       | 62        |
| 2.2.2.    | Fuentes de Datos de Actividad . . . . .                         | 63        |
| 2.2.3.    | Factores de Emisión . . . . .                                   | 66        |
| 2.3.      | Estimación de Emisiones del Transporte Aéreo . . . . .          | 73        |
| 2.3.1.    | Emisiones del Ciclo LTO . . . . .                               | 74        |
| 2.3.2.    | Emisiones de la Fase de CCD . . . . .                           | 76        |
| 2.3.3.    | Fuentes de Datos para Chile . . . . .                           | 79        |
| 2.4.      | Estimación de Emisiones del Transporte Marítimo . . . . .       | 82        |
| 2.4.1.    | Enfoque Metodológico Basado en AIS . . . . .                    | 86        |
| 2.4.2.    | Ecuaciones de Cálculo . . . . .                                 | 87        |
| 2.4.3.    | Bases de Datos del Modo Marítimo . . . . .                      | 87        |
| 2.4.4.    | Factores de Emisión Marítimos . . . . .                         | 91        |
| 2.5.      | Desagregación Espacial . . . . .                                | 96        |

|           |                                                                                                  |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.      | Desagregación Temporal . . . . .                                                                 | 113        |
| 2.6.1.    | Escalas de Variabilidad Temporal . . . . .                                                       | 114        |
| 2.6.2.    | Integración de la Desagregación Espacial y Temporal . . . . .                                    | 117        |
| 2.7.      | Proyecciones de Emisiones al 2050 . . . . .                                                      | 118        |
| 2.7.1.    | Marco de Escenarios . . . . .                                                                    | 118        |
| 2.7.2.    | Variables de Proyección . . . . .                                                                | 121        |
| 2.7.3.    | Explicación de los escenarios marítimos a simular . . . . .                                      | 123        |
| 2.7.4.    | Explicación de los escenarios aéreos a simular . . . . .                                         | 126        |
| 2.8.      | Herramientas Computacionales y Software . . . . .                                                | 134        |
| 2.9.      | Validación y Verificación . . . . .                                                              | 135        |
| <b>3.</b> | <b>Emisiones y Desagregación Espacial</b>                                                        | <b>137</b> |
| 3.1.      | Transporte Terrestre . . . . .                                                                   | 137        |
| 3.1.1.    | Versatilidad Analítica a Escala Local . . . . .                                                  | 154        |
| 3.1.2.    | Validación del Inventario . . . . .                                                              | 156        |
| 3.2.      | Transporte Aéreo . . . . .                                                                       | 159        |
| 3.2.1.    | Desagregación Espacial de Emisiones Aéreas . . . . .                                             | 162        |
| 3.2.2.    | Caracterización y Dominancia de la Flota Comercial . . . . .                                     | 183        |
| 3.2.3.    | Modelación Tridimensional . . . . .                                                              | 186        |
| 3.3.      | Transporte Marítimo . . . . .                                                                    | 188        |
| 3.3.1.    | Estructuración Vectorial en Contenedores GeoPackage y su Rol<br>como Insumo del Modelo . . . . . | 197        |
| 3.3.2.    | Desagregación Espacial de Emisiones Marítimas . . . . .                                          | 204        |
| 3.3.3.    | Caso de Estudio: Análisis Espacial en la Bahía de Quintero . . . . .                             | 211        |
| 3.4.      | Desagregación Espacial con Resolución de 100m x 100m . . . . .                                   | 215        |
| 3.5.      | Unificación de la Desagregación Espacial: Matriz Integral de Transporte                          | 221        |
| 3.6.      | Conclusiones del Capítulo . . . . .                                                              | 227        |
| <b>4.</b> | <b>Desagregación Temporal</b>                                                                    | <b>230</b> |
| 4.1.      | Transporte Terrestre . . . . .                                                                   | 230        |
| 4.2.      | Transporte Marítimo . . . . .                                                                    | 244        |
| 4.2.1.    | Análisis Comparativo Interportuario y Validación Multifactorial                                  | 258        |
| 4.2.2.    | Integración Espacio-Temporal y Mapas de Calor Dinámicos . . . . .                                | 262        |
| 4.3.      | Transporte Aéreo . . . . .                                                                       | 267        |
| 4.4.      | Análisis Integrado Multimodal . . . . .                                                          | 277        |



|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5. Conclusiones del Capítulo . . . . .                                                       | 280        |
| <b>5. Proyección de Emisiones al Año 2050</b>                                                  | <b>282</b> |
| 5.1. Transporte Terrestre . . . . .                                                            | 282        |
| 5.1.1. Simulación de Escenarios Tecnológicos y Penetración de Elec-<br>tromovilidad . . . . .  | 287        |
| 5.1.2. Efecto Actividad versus Efecto Tecnología . . . . .                                     | 292        |
| 5.1.3. Análisis de Proyecciones de Emisiones: Escenario Base vs. Euro 7300                     |            |
| 5.1.4. Cuantificación del Potencial de Abatimiento y Emisiones Evitadas                        | 304        |
| 5.1.5. Efecto de la Expansión de la Red de Metro en la Transferencia<br>Modal . . . . .        | 306        |
| 5.2. Transporte Marítimo . . . . .                                                             | 312        |
| 5.2.1. Resultados de la Proyección de Emisiones del Transporte Ma-<br>rítimo . . . . .         | 314        |
| 5.2.2. Evaluación Sistémica y Descomposición Estratégica . . . . .                             | 323        |
| 5.3. Transporte Aéreo . . . . .                                                                | 328        |
| 5.3.1. Ampliación de Fronteras: Enfoque de Ciclo de Vida (LCA) y<br>Calidad del Aire . . . . . | 331        |
| 5.4. Conclusiones del Capítulo . . . . .                                                       | 336        |
| <b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>                                                       | <b>339</b> |
| 6.1. Conclusiones . . . . .                                                                    | 339        |
| 6.1.1. Conclusión General y Validación de la Hipótesis . . . . .                               | 339        |
| 6.1.2. Conclusiones Específicas . . . . .                                                      | 340        |
| 6.2. Recomendaciones para Trabajos Futuros . . . . .                                           | 342        |
| <b>A. Anexos</b>                                                                               | <b>354</b> |
| A.1. Motor de Desagregación Espacial de Emisiones Marítimas . . . . .                          | 354        |
| A.2. Código de Procesamiento de Emisiones Terrestres . . . . .                                 | 366        |
| A.3. Código de Procesamiento de Emisiones Aéreas . . . . .                                     | 378        |

# Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Evolución de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico entre 1850 y 2019. Fuente: [105] . . . . .                                                                                                                                                                    | 5  |
| 1.2. Evolución histórica de la temperatura superficial global. Se observa un incremento sostenido que culmina en un alza de 1,1°C para el periodo 2011-2020 respecto a los niveles preindustriales. Fuente: [105] . . . . .                                                                                         | 6  |
| 1.3. Crecimiento acelerado de las concentraciones atmosféricas de los principales Gases de Efecto Invernadero (Dióxido de carbono, Metano y Óxido nitroso) desde 1850 hasta 2019. Fuente: [104] . . . . .                                                                                                           | 6  |
| 1.4. Atribución del calentamiento global (2010-2019). El gráfico evidencia la dominancia absoluta de las emisiones antrópicas, donde el calentamiento generado por los GEI es contrarrestado parcialmente por el efecto de enfriamiento de los aerosoles, con una contribución natural nula. Fuente: [85] . . . . . | 7  |
| 1.5. Emisiones históricas acumuladas de CO <sub>2</sub> por región (1850-2019) y distribución de emisiones netas de GEI per cápita frente a la población total regional en el año 2019. Fuente: [85] . . . . .                                                                                                      | 9  |
| 1.6. Evolución temporal de las emisiones globales netas antropogénicas de GEI, segmentadas por región, entre los años 1990 y 2019. Fuente: [54] . . . . .                                                                                                                                                           | 9  |
| 1.7. Actividades de quema de combustible: emisiones de GEI (kt CO <sub>2</sub> eq) por subcategoría, serie 1990-2020. Fuente: [15] . . . . .                                                                                                                                                                        | 12 |
| 1.8. Diagrama de flujo de la metodología COPERT mostrando los <i>inputs</i> y <i>outputs</i> . Fuente: [106] . . . . .                                                                                                                                                                                              | 19 |
| 1.9. Distribución espacial de las emisiones globales de SO <sub>2</sub> de los buques en diferentes años. Fuente: [114] . . . . .                                                                                                                                                                                   | 25 |
| 1.10. Estimación consolidada de las emisiones de CO <sub>2</sub> generadas por el sector aéreo en Chile, diferenciadas por ciclo de vuelo y tipo de ruta [11]. . . . .                                                                                                                                              | 28 |
| 1.11. Distribución espacial de las emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas a la actividad del transporte a lo largo del territorio nacional [11]. . . . .                                                                                                                                                            | 29 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.12. Distribución espacial de las emisiones de NO <sub>x</sub> (Gg/año) mediante celdas de alta resolución en las ciudades colombianas de (a) Barranquilla, (b) Bucaramanga, (c) Medellín y (d) Cali. Los tonos más oscuros indican los focos de mayor intensidad de emisión. . . . . | 32 |
| 1.13. Mapas comparativos de emisiones normalizadas y absolutas y diferencias usando diferentes metodologías y enfoques de desagregación espacial. Fuente: [90] . . . . .                                                                                                               | 33 |
| 1.14. Mapas de distribución espacial de emisiones de NO <sub>x</sub> del transporte por carretera en Chile, mostrando las principales ciudades y corredores viales. Fuente: [86] . . . . .                                                                                             | 36 |
| 1.15. Tendencias de las emisiones anuales totales de escape según tipo de vehículo en Chile, 1990-2020. Fuente: Osses et al. (2022) Earth System Science Data, 14, 1359-1376. . . . .                                                                                                  | 37 |
| 1.16. Factores de peso temporal mensual para la desagregación de emisiones del transporte vial. Se observa la variabilidad intermensual que captura los efectos estacionales y periodos vacacionales en distintos países. Fuente: Guevara et al. (2021) [39]. . . . .                  | 39 |
| 1.17. Comparación de los perfiles mensuales de emisiones agrícolas con los perfiles de EDGAR, EMEP y TNO para los países y categorías seleccionados. Fuente: Guevara et al. (2021) [39]. . . . .                                                                                       | 40 |
| 1.18. Gráficos de perfiles temporales de emisiones del transporte vial para diferentes países/regiones, mostrando variaciones mensuales, semanales y horarias. Fuente: Guevara et al. (2021) Earth System Science Data, 13, 367-404. . . . .                                           | 42 |
| 1.19. Proyecciones de temperatura global y otros parámetros bajo los diferentes escenarios SSP hasta 2100. Fuente: IPCC AR6 Working Group I, Chapter 4. . . . .                                                                                                                        | 44 |
| 1.20. Proyecciones de emisiones globales de CO <sub>2</sub> del transporte hasta 2100. Fuente: IPCC AR6 Working Group I, Chapter 4. . . . .                                                                                                                                            | 45 |
| 1.21. Porcentaje de ventas de vehículos nuevos con cero emisiones por categoría de vehículo bajo los escenarios <i>Baseline</i> , <i>Momentum</i> y <i>Ambitious</i> . Fuente: ICCT (2025). . . . .                                                                                    | 47 |
| 1.22. Proyecciones de emisiones de CO <sub>2</sub> del transporte vial en Chile por categoría vehicular y bajo los escenarios <i>Baseline</i> y <i>Momentum</i> . Fuente: ICCT (2025). . . . .                                                                                         | 48 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.23. Mezcla energética del transporte en Chile bajo escenarios compatibles con 1.5°C. Fuente: Climate Analytics. . . . .                                                                                                                                                            | 48  |
| 1.24. Emisiones directas de CO <sub>2</sub> del sector del transporte de Chile bajo escenarios compatibles con 1.5°C. Fuente: Climate Analytics. . . . .                                                                                                                             | 48  |
| 2.1. Diagrama metodológico del transporte marítimo. Fuente: Elaboración propia. . . . .                                                                                                                                                                                              | 58  |
| 2.2. Diagrama metodológico del transporte aéreo. Fuente: Elaboración propia. . . . .                                                                                                                                                                                                 | 59  |
| 2.3. Diagrama metodológico del transporte terrestre. Fuente: Elaboración propia. . . . .                                                                                                                                                                                             | 60  |
| 2.4. Diagrama de flujo de la estructura metodológica general en cuatro etapas secuenciales. . . . .                                                                                                                                                                                  | 61  |
| 2.5. Mapa del dominio de estudio mostrando las 16 regiones de Chile, la red vial principal, las rutas marítimas, rutas aéreas y aeropuertos. Elaborado con base en datos de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), OpenStreetMap y datos de elaboración propia. . . . . | 62  |
| 2.6. Segmentos vehiculares y su equivalente en COPERT . . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 64  |
| 2.7. Diagrama esquemático de las fases de operación de una aeronave comercial durante un ciclo de vuelo completo. Se distinguen las fases de despegue y aterrizaje (LTO) de la fase de crucero (CCD). . . . .                                                                        | 73  |
| 2.8. Aeropuertos y rutas aéreas elaboradas y usadas para la desagregación espacial de las emisiones. Elaboración propia mediante python y QGIS a partir de datos de fuentes oficiales. . . . .                                                                                       | 103 |
| 2.9. Rutas marítimas elaboradas y usadas para la desagregación espacial de las emisiones. Elaboración propia mediante python y QGIS a partir de datos de fuentes oficiales. . . . .                                                                                                  | 110 |
| 2.10. Metas oficiales de penetración de electromovilidad en Chile. El cuadro contrasta el escenario de referencia frente a las exigencias del plan de carbono neutralidad, definiendo hitos temporales para ventas y composición del parque. . . . .                                 | 119 |
| 2.11. Transición proyectada de la matriz energética (%) por escenario en los hitos temporales 2030, 2040 y 2050. Se observa la penetración gradual del GNL y la adopción masiva de combustibles de cero o bajo GEI en los escenarios más ambiciosos. . . . .                         | 126 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Participación porcentual de las emisiones de $CO_2$ por región para el año 2023. . . . .                                                                                                                                                                                             | 138 |
| 3.2. Emisiones totales de material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ) por región durante el año 2023, expresadas en Gg/año. . . . .                                                                                                                                                          | 139 |
| 3.3. Top 20 de provincias con mayor cantidad de habitantes. Se evidencia la macrocefalia demográfica de la provincia de Santiago respecto al resto del país. . . . .                                                                                                                      | 140 |
| 3.4. Mapas de calor de la distribución poblacional a nivel provincial. Izquierda: Clasificación mediante segmentación por rangos. Derecha: Distribución visualizada utilizando una escala logarítmica para atenuar los valores atípicos del centro del país. . . . .                      | 141 |
| 3.5. Emisiones provinciales de $CO_2$ durante 2023. Izquierda: Ranking de las 20 provincias con mayor volumen de emisión. Derecha: Desglose de la contribución provincial al interior de cada macrozona regional. . .                                                                     | 142 |
| 3.6. Emisiones provinciales de $NO_x$ en 2023. Izquierda: Las 20 provincias más emisoras. Derecha: Distribución interna de las emisiones nitrogenadas por región. . . . .                                                                                                                 | 142 |
| 3.7. Visualización a escala nacional del proxy interurbano total. La paleta de colores en escala logarítmica resalta la conectividad longitudinal del país y atenúa la hiperconcentración de la zona central. . . . .                                                                     | 144 |
| 3.8. Distribución de ponderadores espaciales en la zona central. Izquierda: Proxy interurbano, evidenciando la red de autopistas y rutas periféricas. Derecha: Proxy urbano, caracterizado por una alta densidad reclusa en el núcleo del Gran Santiago y capitales provinciales. . . . . | 145 |
| 3.9. Grillas de alta resolución para la Región Metropolitana y alrededores (2023). Izquierda: Emisiones totales de $CO_2$ . Derecha: Emisiones totales de $NO_x$ . . . . .                                                                                                                | 145 |
| 3.10. Proceso de optimización algorítmica del modelo de desagregación espacial. Los recuadros ilustran cómo la integración de factores de ponderación comunal repercute sustancialmente en la resolución de la grilla hasta capturar con exactitud la topología vial. . . . .             | 147 |
| 3.11. Matriz de intensidad regional para emisiones de $NO_x$ (2023). Las tonalidades oscuras advierten sobre la criticidad del transporte pesado (CAM) y los vehículos livianos (VLP) en zonas específicas. . . . .                                                                       | 149 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.12. Composición proporcional de las emisiones de $NO_x$ por categoría vehicular. Se constata la predominancia del transporte de carga en la matriz extra-capitalina. . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 150 |
| 3.13. Desglose de emisiones de $NO_x$ discriminando por ámbito operativo (urbano e interurbano). La tracción de carga interurbana y la movilidad urbana particular definen el inventario. . . . .                                                                                                                                                                                                                        | 150 |
| 3.14. Matriz de intensidad regional para la huella de carbono del transporte (2023). Se exhibe una hiperconcentración extrema en los vehículos livianos de la capital. . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 151 |
| 3.15. Distribución sectorial de las emisiones de $CO_2$ . La abrumadora contribución del parque liviano (VLP) en la R13 dictamina el comportamiento del inventario global. . . . .                                                                                                                                                                                                                                       | 152 |
| 3.16. Emisiones de dióxido de carbono por ámbito y tipología. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 152 |
| 3.17. Mapas de calor diferenciales para emisiones de $PM_{2,5}$ en la Región Metropolitana (2023). Izquierda: Contraste entre vehículos livianos (VLP) y camiones (CAM), donde el rojo marca la supremacía del transporte de carga. Derecha: Contraste entre VLP y buses (BUS), evidenciando un núcleo azul dominado por automóviles y corredores rojizos de transporte público. . . . .                                 | 153 |
| 3.18. Cartografía de emisiones terrestres mediante desagregación espacial. El mapa de calor ilustra las zonas de mayor concentración de actividad vehicular en las comunas analizadas. . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 155 |
| 3.19. Inventario comunal de emisiones de $CO_2$ en la Región de Valparaíso (año 2023), demostrando la asimetría en la contribución de los distintos centros urbanos. . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 156 |
| 3.20. Validación histórica del modelo terrestre (1990-2023). Arriba: Contraste de emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) frente a repositorios internacionales, destacando la fuerte convergencia con los datos de la IEA. Abajo: Comparativa para óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), donde la estimación <i>bottom-up</i> navega de forma coherente dentro del espectro de dispersión de los modelos globales. . . . . | 158 |
| 3.21. Caracterización estructural del tráfico aéreo. Izquierda: Mapeo de la conectividad nacional en donde se ilustra la intensidad de flujo. Derecha: Matriz de tráfico porcentual entre las 12 ciudades principales, confirmando la hegemonía del nodo central. . . . .                                                                                                                                                | 159 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.22. Dinámica operativa de la flota. Izquierda: Histograma que evidencia la concentración de la demanda en tramos de corto y medio alcance. Derecha: Dispersión de rutas según frecuencia y distancia; el tamaño de la burbuja parametriza el indicador FKM, revelando el verdadero peso ambiental de cada trayecto. . . . . | 160 |
| 3.23. Contraste metodológico: Top 10 rutas ordenadas por cantidad bruta de vuelos (izquierda) frente al ordenamiento por Esfuerzo de Transporte o FKM (derecha). El FKM reescribe la jerarquía de emisiones, elevando el impacto de conexiones australes y largas distancias. . . . .                                         | 161 |
| 3.24. Desglose de la huella de carbono ( $CO_2$ ) para las 15 rutas más contaminantes del país. La barra distingue la contribución volumétrica de la fase de crucero (CCD) y la carga ambiental depositada a nivel de suelo durante los ciclos LTO. . . . .                                                                   | 162 |
| 3.25. Trazado preliminar de corredores aéreos a escala macrozonal (Norte, Centro y Sur). Estas líneas actúan como vectores de distribución espacial para asignar el consumo de combustible en la fase de crucero. . . . .                                                                                                     | 163 |
| 3.26. Detalle cartográfico de los ponderadores espaciales en la zona central. Se distinguen las áreas de influencia directa de los aeropuertos y la convergencia de las rutas aéreas hacia el terminal principal. . . . .                                                                                                     | 164 |
| 3.27. Ejemplo del archivo excel generado con las rutas aéreas unificadas y toda su información respectiva. . . . .                                                                                                                                                                                                            | 165 |
| 3.28. Ejemplo del archivo excel generado con las rutas aéreas unificadas y toda su información respectiva a la fase CCD . . . . .                                                                                                                                                                                             | 166 |
| 3.29. Ejemplo del archivo excel generado que contiene a los aeropuertos con toda su información geográfica y las emisiones asociadas a cada uno. . .                                                                                                                                                                          | 166 |
| 3.30. Visualización de las rutas aéreas unificadas con toda su información respectiva en la tabla de atributos. . . . .                                                                                                                                                                                                       | 167 |
| 3.31. Distribución porcentual de emisiones de $CO_2$ por fase operacional (LTO vs. CCD) durante el año 2023. . . . .                                                                                                                                                                                                          | 168 |
| 3.32. Distribución porcentual de emisiones de $NO_x$ por fase operacional (LTO vs. CCD) durante el año 2023. . . . .                                                                                                                                                                                                          | 169 |
| 3.33. Jerarquización de las 15 principales rutas aéreas en crucero y los 15 aeropuertos con mayor impacto en la fase LTO para emisiones de $CO_2$ . .                                                                                                                                                                         | 170 |
| 3.34. Jerarquización de las 15 principales rutas aéreas en crucero y los 15 aeropuertos con mayor impacto en la fase LTO para emisiones de $NO_x$ . .                                                                                                                                                                         | 170 |

|                                                                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.35. Distribución espacial de las emisiones de CO <sub>2</sub> en Chile para la fase de aterrizaje y despegue (LTO) durante el año 2023. . . . .                                                                    | 172 |
| 3.36. Distribución espacial de las emisiones de CO <sub>2</sub> en Chile para la fase de crucero, ascenso y descenso (CCD) durante el año 2023. . . . .                                                              | 173 |
| 3.37. Distribución espacial integrada de las emisiones totales de CO <sub>2</sub> en el territorio nacional para el periodo 2023. . . . .                                                                            | 174 |
| 3.38. Distribución espacial de las emisiones de NO <sub>x</sub> en Chile para la fase de aterrizaje y despegue (LTO) durante el año 2023. . . . .                                                                    | 175 |
| 3.39. Distribución espacial de las emisiones de NO <sub>x</sub> en Chile para la fase de crucero, ascenso y descenso (CCD) durante el año 2023. . . . .                                                              | 176 |
| 3.40. Distribución espacial integrada de las emisiones totales de NO <sub>x</sub> en el territorio nacional para el periodo 2023. . . . .                                                                            | 177 |
| 3.41. Detalle cartográfico de alta resolución espacial para la desagregación de rutas aéreas y celdas de emisión de CO <sub>2</sub> durante el periodo 2023. . .                                                     | 178 |
| 3.42. Desagregación espacial de emisiones aéreas de CO <sub>2</sub> (Gg) en la zona central de Chile para el año 2023. . . . .                                                                                       | 179 |
| 3.43. Desagregación espacial de emisiones aéreas de CO <sub>2</sub> (Gg) en la zona norte de Chile para el año 2023. . . . .                                                                                         | 180 |
| 3.44. Desagregación espacial de emisiones aéreas de CO <sub>2</sub> (Gg) en la zona sur de Chile para el año 2023. . . . .                                                                                           | 180 |
| 3.45. Desagregación espacial de emisiones aéreas de NO <sub>x</sub> (Gg) en la zona central de Chile para el año 2023. . . . .                                                                                       | 181 |
| 3.46. Desagregación espacial de emisiones aéreas de NO <sub>x</sub> (Gg) en la zona norte de Chile para el año 2023. . . . .                                                                                         | 182 |
| 3.47. Desagregación espacial de emisiones aéreas de NO <sub>x</sub> (Gg) en la zona sur de Chile para el año 2023. . . . .                                                                                           | 182 |
| 3.48. Diagrama de Pareto de las operaciones (ciclos LTO) por modelo de aeronave. Se evidencia que apenas dos modelos concentran más del 80 % del tráfico nacional. . . . .                                           | 184 |
| 3.49. Composición porcentual de la flota aérea nacional en operaciones. El área de cada bloque es proporcional a la cuota de mercado del modelo respectivo. . . . .                                                  | 185 |
| 3.50. Cuota de mercado operativa destacando el dominio de la familia Airbus. Los cinco modelos principales, todos pertenecientes al mismo fabricante, conforman más del 96 % de los despegues y aterrizajes. . . . . | 185 |



|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.51. Visualización tridimensional de las trayectorias integradas de emisión de NO <sub>x</sub> total para el transporte aéreo nacional (año 2023).                                                       | 186 |
| 3.52. Interfaz de rastreo satelital AIS utilizada para levantar parámetros cinemáticos y perfiles operativos de las naves mercantes en ruta.                                                              | 197 |
| 3.53. Matriz de cálculo relacional estructurando las emisiones ruta por ruta.                                                                                                                             | 198 |
| 3.54. Calculadora paramétrica consolidando el tonelaje por puerto previo a su exportación GIS.                                                                                                            | 198 |
| 3.55. Levantamiento espacial de la red portuaria nacional en QGIS, estableciendo los nodos receptores del inventario de emisiones.                                                                        | 199 |
| 3.56. Visualización extendida de los corredores logísticos estructurantes de la costa norte de Chile.                                                                                                     | 199 |
| 3.57. Visualización integrada de la red nacional de rutas marítimas de cabotaje estructurada a partir de datos geoespaciales AIS.                                                                         | 200 |
| 3.58. Visualización de capas vectoriales de rutas y puertos integradas en el GeoPackage para la zona centro y sur-centro.                                                                                 | 202 |
| 3.59. Modelación geométrica de pasillos interiores de navegación en los sistemas de fiordos del extremo sur de Chile.                                                                                     | 202 |
| 3.60. Esquema alfanumérico y campos de emisión integrados en la tabla de atributos de la capa vectorial de rutas marítimas.                                                                               | 203 |
| 3.61. Campos de base de datos relacional y asignación de coordenadas geográficas en la capa de nodos portuarios.                                                                                          | 204 |
| 3.62. Resultados de la desagregación espacial de alta resolución en la zona central de Chile (periodo 2023).                                                                                              | 205 |
| 3.63. Distribución espacial de emisiones marítimas de CO <sub>2</sub> (Gg) para el año 2019 en la costa central de Chile. Se observan las altas concentraciones en los terminales portuarios principales. | 206 |
| 3.64. Distribución espacial de emisiones marítimas de NO <sub>x</sub> (Gg) para el año 2019 en la costa central de Chile. Este mapa incluye una escala espacial de referencia.                            | 207 |
| 3.65. Distribución espacial de emisiones marítimas de NO <sub>x</sub> (Gg) para el año 2019 en una zona costera del sur de Chile, caracterizada por un archipiélago y canales.                            | 208 |
| 3.66. Trazas de emisión celular en el nodo portuario-industrial de Mejillones y Antofagasta.                                                                                                              | 209 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.67. Cartografía rasterizada de emisiones marítimas en aguas interiores y<br>nodos de conectividad del sur de Chile. . . . .                                                                                                                                                | 210 |
| 3.68. Catastro satelital de sitios de atraque y terminales. . . . .                                                                                                                                                                                                          | 211 |
| 3.69. Identificación de la zona principal de fondeo. . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 211 |
| 3.70. Vectores de aproximación y polígonos de influencia. . . . .                                                                                                                                                                                                            | 211 |
| 3.71. Traducción de la infraestructura portuaria a un entorno SIG, estructu-<br>rando la base geométrica para la asignación del inventario de emisiones. . . . .                                                                                                             | 212 |
| 3.72. Distribución espacial y densidad de emisiones de Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ). . . . .                                                                                                                                                                                  | 213 |
| 3.73. Grilla térmica que acusa la concentración operativa de Material Parti-<br>culado ( $PM_{2,5}$ ). . . . .                                                                                                                                                               | 213 |
| 3.74. Desagregación espacial de Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) [T/año] en la<br>Bahía de Quintero, evidenciando el impacto directo de las trayectorias<br>de aproximación. . . . .                                                                                           | 214 |
| 3.75. Distribución de las emisiones de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) [T/año],<br>marcando las zonas de mayor intensidad operativa e ineficiencia térmica. . . . .                                                                                                            | 214 |
| 3.76. Desagregación de emisiones marítimas de $CO_2$ a resolución de 100mx100m<br>en la costa de la Región de Valparaíso (2019). . . . .                                                                                                                                     | 216 |
| 3.77. Acercamiento a la matriz de 100mx100m en la zona de Quintero, evi-<br>denciando las trayectorias individuales de las naves. . . . .                                                                                                                                    | 217 |
| 3.78. Detalle del acceso al puerto de San Antonio bajo la grilla de altísima re-<br>solución (100mx100m), mostrando la convergencia de rutas comerciales. . . . .                                                                                                            | 217 |
| 3.79. Mapa de alta resolución (100mx100m) para las emisiones marítimas de<br>$CO_2$ en el sistema de canales del sur de Chile (2019). . . . .                                                                                                                                | 218 |
| 3.80. Acercamiento a las vías de navegación confinada en la zona sur, mode-<br>ladas a 100mx100m. . . . .                                                                                                                                                                    | 218 |
| 3.81. Emisiones aéreas de $CO_2$ desagregadas a 100mx100m en el espacio<br>aéreo de Santiago (2023). . . . .                                                                                                                                                                 | 219 |
| 3.82. Acercamiento a los vectores de aproximación y maniobras aéreas sobre<br>la Región Metropolitana a resolución fina. . . . .                                                                                                                                             | 220 |
| 3.83. Contraste metodológico de desagregación de $CO_2$ terrestre (2024). La<br>Región Metropolitana se grafica a 100mx100m (R13) y la Región de<br>Valparaíso a 1kmx1km (R5). El cambio de área de celda induce un<br>efecto visual sobre la concentración de masa. . . . . | 220 |
| 3.84. Mapa nacional de emisiones totales de $CO_2$ provenientes de los tres<br>modos de transporte (terrestre, marítimo y aéreo) para el año 2023. . . . .                                                                                                                   | 222 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.85. Mapa nacional de emisiones totales de NOx provenientes de los tres modos de transporte (terrestre, marítimo y aéreo) para el año 2023. . . . .                                                                                                                                             | 223 |
| 3.86. Vista detallada de la desagregación espacial unificada de emisiones de CO2 (Gg) en la zona central de Chile. . . . .                                                                                                                                                                       | 224 |
| 3.87. Vista detallada de la desagregación espacial unificada de emisiones de NOx (Gg) en la zona central de Chile. . . . .                                                                                                                                                                       | 225 |
| 3.88. Verificación de los valores de emisión acumulados de CO2 (Gg) en puertos y aeropuertos clave de la zona central, asegurando la conservación de los datos tras la unificación espacial. . . . .                                                                                             | 226 |
| 3.89. Verificación de los valores de emisión acumulados de NOx (Gg) en puertos y aeropuertos clave, demostrando la integridad matemática del ráster consolidado. . . . .                                                                                                                         | 226 |
| 4.1. Trayectoria histórica normalizada de emisiones del transporte terrestre (Base 1990 = 1). Se evidencia el desacople entre contaminantes globales (CO <sub>2</sub> ) y locales (CO, NMVOC) producto del recambio tecnológico. . . . .                                                         | 231 |
| 4.2. Evolución regional normalizada de las emisiones de CO <sub>2</sub> (Base 1990 = 1). Las fluctuaciones capturan con alta sensibilidad los ciclos económicos y el impacto del confinamiento en 2020. . . . .                                                                                  | 232 |
| 4.3. Trayectoria regional normalizada del monóxido de carbono (CO) respecto a 1990. Muestra una contención tecnológica exitosa y transversal en todas las zonas del país. . . . .                                                                                                                | 233 |
| 4.4. Desglose comparativo de los perfiles de actividad mensual por categoría vehicular en rutas interurbanas. Resaltan los picos de movilidad particular durante la época estival frente a la inercia plana de los camiones. . . . .                                                             | 234 |
| 4.5. Distribución acumulada de la actividad interurbana a lo largo del año. La sumatoria expone una depresión característica en la movilidad global durante los meses de invierno (junio y julio). . . . .                                                                                       | 235 |
| 4.6. Distribución de la carga vehicular comparando el bloque laboral (Lunes a Viernes) frente al fin de semana. Se constata que más del 70 % de la movilidad semanal ocurre durante los días hábiles. . . . .                                                                                    | 236 |
| 4.7. Análisis de intensidad circulatoria por día de la semana. Izquierda: Curvas de distribución proporcional. Derecha: Mapa de calor de intensidad diaria. Ambos gráficos confirman que el día viernes representa el pico máximo de actividad semanal para la mayoría de los segmentos. . . . . | 237 |

|                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.8. Perfil temporal integrado (168 horas) de emisiones de $CO_2$ en la Región Metropolitana. . . . .                                                                                                                                               | 238 |
| 4.9. Reloj de fases diarias para emisiones de $NO_x$ , normalizado al peak horario. . . . .                                                                                                                                                         | 239 |
| 4.10. Integración espacio-temporal: Ciclo diario de emisiones y su distribución espacial sobre la red a las 14:00 hrs. . . . .                                                                                                                      | 239 |
| 4.11. Variabilidad horaria del ratio químico $NO_x/PM_{2,5}$ . El incremento durante la madrugada responde a la desaparición del parque liviano y la predominancia del transporte de carga diésel interurbano. . . . .                              | 240 |
| 4.12. Simulación de impacto para una restricción del 50 % a vehículos livianos (VLP) entre las 07:00 y 11:00 horas. El modelo cuantifica las toneladas de $CO_2$ evitadas y espacializa el beneficio sobre el radio céntrico de la capital. . . . . | 241 |
| 4.13. Evaluación de una restricción total (100 %) para la circulación de camiones (CAM) durante la mañana (07:00 a 12:00 horas). Se observa el severo recorte temporal de $NO_x$ y su foco de alivio espacial sobre el anillo periférico. . . . .   | 241 |
| 4.14. Evolución temporal del índice de carga nacional de emisiones horarias de $CO_2$ . . . . .                                                                                                                                                     | 242 |
| 4.15. Distribución espacial y contraste del índice de emisiones de $CO_2$ en la zona central para ventanas horarias seleccionadas. . . . .                                                                                                          | 243 |
| 4.16. Matriz relacional de datos limpios de actividad portuaria y variables cronológicas en la hoja de cálculo de control. . . . .                                                                                                                  | 245 |
| 4.17. Perfil temporal de actividad marítima a resolución semanal agregada. . .                                                                                                                                                                      | 246 |
| 4.18. Perfil temporal de actividad marítima a resolución mensual agregada. .                                                                                                                                                                        | 247 |
| 4.19. Proyección de las emisiones de $CO_2$ (Gg) para el año de estudio bajo desagregación temporal. . . . .                                                                                                                                        | 249 |
| 4.20. Proyección de las emisiones de $NO_x$ (Gg) para el año de estudio bajo desagregación temporal. . . . .                                                                                                                                        | 250 |
| 4.21. Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de Mejillones (2023) discriminado por flujo de naves. . . . .                                                                                                                | 253 |
| 4.22. Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de San Antonio (2023) discriminado por flujo de naves. . . . .                                                                                                               | 254 |
| 4.23. Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de Arica (2023) discriminado por flujo de naves. . . . .                                                                                                                     | 256 |

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.24. Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de Iquique (2023) discriminado por flujo de naves. . . . .                                                                            | 257 |
| 4.25. Comparación interportuaria de los perfiles temporales de actividad mensual (tránsito combinado) durante el periodo 2023. . . . .                                                                       | 258 |
| 4.26. Modelación comparativa interportuaria del flujo de masa mensual absoluto para CO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> . . . . .                                                                              | 260 |
| 4.27. Modelación comparativa interportuaria del flujo de masa mensual absoluto para compuestos criterio (SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> y BC). . . . .                                                    | 261 |
| 4.28. Modelación espacio-temporal comparativa de las emisiones marítimas de alta resolución en la zona central de Chile. . . . .                                                                             | 263 |
| 4.29. Modelación espacio-temporal comparativa del flujo naviero en el polo portuario de Mejillones. . . . .                                                                                                  | 264 |
| 4.30. Perfil de desagregación temporal de emisiones de CO <sub>2</sub> en el sector marítimo. Se identifican anomalías en los extremos del ciclo asociadas a criterios de asignación administrativa. . . . . | 265 |
| 4.31. Distribución espacial del índice de emisiones marítimas de CO <sub>2</sub> en la costa nacional para horarios seleccionados. . . . .                                                                   | 266 |
| 4.32. Distribución temporal mensual de vuelos. Se aprecia el porcentaje de operaciones por mes respecto al total anual, destacando el incremento durante la temporada estival. . . . .                       | 267 |
| 4.33. Distribución estacional de vuelos. Proporción del tráfico aéreo segregado por las cuatro estaciones del año. . . . .                                                                                   | 268 |
| 4.34. Evolución semanal del tráfico aéreo. Variación porcentual del volumen de vuelos a lo largo de las semanas del año. . . . .                                                                             | 269 |
| 4.35. Distribución de vuelos por día de la semana. Se observa una mayor concentración de operaciones durante los días hábiles frente a una disminución durante los fines de semana. . . . .                  | 269 |
| 4.36. Perfil horario de vuelos a lo largo del ciclo diario. El área sombreada indica las horas valle o nocturnas, contrastando con la alta concentración de actividad en horario diurno. . . . .             | 270 |
| 4.37. Distribución horaria normalizada del inventario de emisiones aeronáuticas para los años 2022 y 2023. . . . .                                                                                           | 271 |
| 4.38. Modulaci3n diaria de las tasas de emisi3n aérea a lo largo de la semana para los ciclos 2022 y 2023. . . . .                                                                                           | 272 |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.39. Evolución y fluctuación mensual de la carga de emisión del transporte aéreo (Enero-Diciembre). . . . .                                                                                                                                              | 272 |
| 4.40. Porcentajes de distribución de emisiones aeronáuticas agregadas por estación climática. . . . .                                                                                                                                                     | 273 |
| 4.41. Gráficos de tendencia temporal continua exportados por el modelo numérico acoplado. . . . .                                                                                                                                                         | 274 |
| 4.42. Perfil de desagregación temporal de emisiones de $CO_2$ en la aviación chilena: asignación horaria de la carga operativa (izquierda) y fracción acumulada diaria (derecha). . . . .                                                                 | 275 |
| 4.43. Contraste espacial de las emisiones de $CO_2$ por aviación en Chile para la hora de mínima actividad (03:00), hora pico (10:00) y balance diferencial neto. . . . .                                                                                 | 276 |
| 4.44. Contribución multimodal horaria al inventario integrado de $NO_x$ : carga absoluta por modo (izquierda) y fracción porcentual de la participación horaria (derecha). . . . .                                                                        | 277 |
| 4.45. Mapas de calor integrados de $NO_x$ a escala regional en cuatro ventanas horarias críticas. . . . .                                                                                                                                                 | 278 |
| 4.46. Distribución espacial de $NO_x$ en el área urbana de Santiago y el anillo de la autopista Américo Vespucio. . . . .                                                                                                                                 | 279 |
| 5.1. Comparación histórica y proyectada de la actividad vehicular (VKT). Se observa una fuerte convergencia a largo plazo entre el modelo propuesto, estudios previos y los compromisos NDC. . . . .                                                      | 283 |
| 5.2. Análisis de divergencia mediante diferencia porcentual simétrica del VKT. El desfase máximo se concentra en el periodo de disrupción operativa 2018-2021. . . . .                                                                                    | 284 |
| 5.3. Evolución proyectada y normalizada de contaminantes para el escenario BAU (Base 2024 = 1.0). Destaca la caída generalizada de precursores tóxicos y la resistencia a la baja del $CO_2$ . . . . .                                                    | 285 |
| 5.4. Contraste de proyecciones absolutas (1990-2050). Izquierda: Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ). Derecha: Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ). Las series temporales ratifican la estabilidad del cálculo en ambos extremos del espectro de combustión. . . . . | 286 |
| 5.5. Comparación de trayectorias proyectadas para el Material Particulado Fino ( $PM_{2,5}$ ). . . . .                                                                                                                                                    | 286 |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6.  | Proyección del VKT segregado por tipología vehicular. Los vehículos livianos de pasajeros (VLP) y comerciales (VLC) mantienen la hegemonía del flujo vial hacia mediados de siglo. . . . .                                                                                                                                               | 288 |
| 5.7.  | Evolución del parque en el Escenario BAU. Arriba: Transición tecnológica continua del VKT. Abajo: Comparativa de magnitud por hitos temporales. La norma Euro 6 domina el mercado, mientras la tracción eléctrica gana terreno gradualmente hacia 2050. . . . .                                                                          | 289 |
| 5.8.  | Escenario contrafactual con nula penetración eléctrica. Arriba: Absorción total del crecimiento por motores térmicos. Abajo: Saturación de la norma Euro 6 en los hitos de proyección. . . . .                                                                                                                                           | 290 |
| 5.9.  | Evolución bajo el Escenario Pesimista. El retardo en la adopción tecnológica comprime la cuota de mercado eléctrico, obligando a extender la vida útil y presencia operativa de motores térmicos. . . . .                                                                                                                                | 291 |
| 5.10. | Dinámica del Escenario Optimista. La transición forzada invierte la matriz energética hacia el año 2050, transformando a la electromovilidad en la fuerza motriz predominante del parque automotriz chileno. . . . .                                                                                                                     | 293 |
| 5.11. | Caracterización del escenario BAU al 2050. Izquierda: Análisis de Pareto que identifica a los segmentos livianos como focos críticos de emisión. Derecha: Proyección de la acumulación histórica de $CO_2$ durante el periodo de evaluación. . . . .                                                                                     | 294 |
| 5.12. | Mecánica interna del escenario sin electromovilidad. Izquierda: Descomposición de la variación de $CO_2$ (2020 vs 2050), evidenciando la incapacidad de la tecnología actual para frenar la expansión del parque. Derecha: Divergencia sostenida entre el aumento de la actividad vehicular y el estancamiento de la eficiencia. . . . . | 294 |
| 5.13. | Desempeño estructural bajo el Escenario Base. Izquierda: La penetración tecnológica (barra verde) adquiere la magnitud necesaria para anular la presión de la actividad. Derecha: Desplome del factor de emisión a partir de la década de 2030, forzando a la curva de $CO_2$ a descender por debajo de los niveles iniciales. . . . .   | 295 |
| 5.14. | Evolución histórica y proyectada de la actividad de la flota a nivel nacional (Total VKT) bajo el escenario BAU. . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 296 |
| 5.15. | Trayectoria de los Vehículos Livianos de Pasajeros (VLP). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                        | 296 |
| 5.16. | Trayectoria de los Vehículos Livianos Comerciales (VLC). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                         | 296 |
| 5.17. | Actividad VKT: Camiones Livianos. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 297 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.18. Actividad VKT: Camiones Medianos. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                            | 297 |
| 5.19. Actividad VKT: Camiones Pesados. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                             | 297 |
| 5.20. Mapa de calor de la penetración de estándares de emisión a nivel nacional (2026-2050). La intensidad del color refleja la cuota de mercado relativa de cada tecnología. . . . .                                                                                                                      | 298 |
| 5.21. Composición porcentual de la flota nacional en hitos clave (2030 - 2050), evidenciando el avance del estándar Euro 7 y la electrificación. .                                                                                                                                                         | 299 |
| 5.22. Hitos de adopción tecnológica para la categoría de Vehículos Livianos de Pasajeros (VLP). . . . .                                                                                                                                                                                                    | 299 |
| 5.23. Hitos de adopción tecnológica para la categoría de Camiones Pesados (CAM PES). . . . .                                                                                                                                                                                                               | 299 |
| 5.24. Comparación de las emisiones totales de $NO_x$ entre el escenario base y el escenario Euro 7 (2024-2050). . . . .                                                                                                                                                                                    | 301 |
| 5.25. Evolución de las emisiones de $NO_x$ en vehículos pesados (camiones) bajo los dos escenarios en estudio. . . . .                                                                                                                                                                                     | 301 |
| 5.26. Emisiones proyectadas de $NO_x$ para la categoría de vehículos ligeros. .                                                                                                                                                                                                                            | 302 |
| 5.27. Trayectoria temporal de las emisiones de $CO_2$ en el parque de vehículos ligeros. . . . .                                                                                                                                                                                                           | 303 |
| 5.28. Emisiones globales del sector automotriz expresadas en toneladas de $CO_2$ por año. . . . .                                                                                                                                                                                                          | 303 |
| 5.29. Potencial de abatimiento de $CO_2$ (BAU vs. Sin Electromovilidad). Izquierda: Área de mitigación acumulada que representa un ahorro del 40.2 % hacia el final del periodo. Derecha: Crecimiento exponencial de las toneladas evitadas anualmente, superando las 18.800 millones al año 2050. . . . . | 304 |
| 5.30. Potencial de abatimiento de $NO_x$ (BAU vs. Sin Electromovilidad). Izquierda: Desacople de las trayectorias con un 32.4 % de mitigación final. Derecha: Distribución de las toneladas de óxidos de nitrógeno evitadas por año. . . . .                                                               | 305 |
| 5.31. Esfuerzo de mitigación adicional para $CO_2$ (Optimista vs. BAU). Izquierda: La intervención normativa fuerza el descenso de la curva logrando un ahorro extra del 32.7 %. Derecha: Toneladas adicionales mitigadas por año gracias a la restricción a las ventas térmicas. . . . .                  | 305 |



|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.32. Potencial de abatimiento complementario de $NO_x$ (Optimista vs. BAU).<br>La aceleración tecnológica recorta un 17.7 % extra sobre las proyecciones inerciales de calidad del aire. . . . .                                    | 306 |
| 5.33. Evolución proyectada de los kilómetros recorridos (VKT) a nivel urbano. Se ilustra la brecha generada por el cambio modal en la Región Metropolitana frente al escenario inercial. . . . .                                     | 307 |
| 5.34. Trayectoria temporal de las emisiones de $CO_2$ evitadas anualmente en Santiago, con un ahorro acumulado superior a 21,5 millones de toneladas.                                                                                | 308 |
| 5.35. Impacto porcentual relativo del cambio modal sobre el inventario total de emisiones a nivel nacional. . . . .                                                                                                                  | 308 |
| 5.36. Mapa de calor que desglosa la intensidad de la reducción de emisiones de $CO_2$ según la categoría de los vehículos desplazados. . . . .                                                                                       | 309 |
| 5.37. Proyección de kilómetros recorridos (VKT) en Santiago. Contraste entre el crecimiento orgánico del parque y el escenario de mitigación por la entrada de las nuevas líneas de Metro. . . . .                                   | 310 |
| 5.38. Volumen absoluto de emisiones de $CO_2$ evitadas anualmente producto de la expansión del Metro. . . . .                                                                                                                        | 310 |
| 5.39. Reducción relativa del $CO_2$ , alcanzando cerca del 16 % del total de emisiones proyectadas para Santiago. . . . .                                                                                                            | 310 |
| 5.40. Desglose de la reducción de emisiones por categoría vehicular en Santiago, hito año 2035. . . . .                                                                                                                              | 311 |
| 5.41. Panel de proyección temporal comparando el escenario inercial (E0) frente a las sendas de mitigación (E1 a E5). Se observa el punto de quiebre estructural en la curva de emisiones al aplicar regulaciones estrictas. . . . . | 313 |
| 5.42. Desglose proporcional y absoluto por tipo de contaminante a lo largo del periodo modelado, desnudando la persistencia estructural de gases como el $SO_2$ y el $NO_x$ en la matriz naviera. . . . .                            | 313 |
| 5.43. Jerarquización territorial de la huella de carbono marítima, exponiendo a San Antonio y Mejillones como los focos primarios de tensión logística.                                                                              | 314 |
| 5.44. Matriz de vulnerabilidad local al 2050. Ilustra cómo la agresividad de cada escenario de mitigación logra (o fracasa en) apagar los puntos calientes de $NO_x$ en los puertos críticos. . . . .                                | 314 |
| 5.45. Evolución proyectada de $CO_2$ . Se evidencia fuerte divergencia por combustibles alternativos. . . . .                                                                                                                        | 315 |

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.46. Trayectorias de emisión de N <sub>2</sub> O. Menor dispersión frente a otros GEI. .                                                                       | 315 |
| 5.47. Emisiones de SO <sub>2</sub> . Reducciones casi totales hacia 2050 por adopción<br>de combustibles limpios. . . . .                                       | 316 |
| 5.48. Evolución de NO <sub>x</sub> . Quiebre de tendencia desde 2030 en descarboniza-<br>ción profunda. . . . .                                                 | 316 |
| 5.49. Proyección de PM <sub>2.5</sub> . Erradicación virtual bajo los escenarios de com-<br>bustibles cero GEI. . . . .                                         | 316 |
| 5.50. Emisiones de PM <sub>10</sub> . Tendencia decreciente análoga a la reducción de<br>partículas finas. . . . .                                              | 316 |
| 5.51. Evolución de Carbono Negro (BC). Su reducción acompaña la elimi-<br>nación de combustibles pesados. . . . .                                               | 317 |
| 5.52. Emisiones de Monóxido de Carbono (CO). Caída sustancial por mayor<br>eficiencia térmica. . . . .                                                          | 317 |
| 5.53. Evolución de NMVOC. Se aprecian las limitaciones del GNL por des-<br>lizamiento de metano. . . . .                                                        | 317 |
| 5.54. Emisiones de NH <sub>3</sub> . Requerirán monitoreo estricto ante el futuro uso de<br>amoníaco verde. . . . .                                             | 317 |
| 5.55. Presupuesto acumulado de CO <sub>2</sub> . Los escenarios E4 y E5 logran reducir<br>el inventario a menos de la mitad respecto a la línea base. . . . .   | 318 |
| 5.56. Masa total emitida de N <sub>2</sub> O. Se observa un límite estructural a la miti-<br>gación entre los escenarios alternativos. . . . .                  | 318 |
| 5.57. Presupuesto acumulado de SO <sub>2</sub> . La contracción del inventario es pro-<br>porcional a la eliminación de derivados pesados del petróleo. . . . . | 319 |
| 5.58. Masa total emitida de NO <sub>x</sub> , evidenciando una caída superior al 50 %<br>entre el escenario de inacción (E0) y Chile Acelerado (E5). . . . .    | 319 |
| 5.59. Presupuesto acumulado de PM <sub>2.5</sub> . Refleja la limitación total de partí-<br>culas respirables vertidas al ambiente. . . . .                     | 319 |
| 5.60. Masa total emitida de PM <sub>10</sub> , mostrando una tendencia congruente con<br>la contracción de la fracción fina. . . . .                            | 319 |
| 5.61. Inventario de emisiones de Carbono Negro (BC). El presupuesto se<br>restringe casi a la mitad en los escenarios óptimos. . . . .                          | 320 |
| 5.62. Presupuesto de Monóxido de Carbono (CO). Su mitigación se alinea<br>con la mayor eficiencia térmica de las nuevas plantas motrices. . . . .               | 320 |
| 5.63. Inventario de NMVOC. Se evidencia el efecto de . <sup>estancamiento</sup> . <sup>en</sup> E2,<br>producto de las pérdidas operativas de gas. . . . .      | 320 |

|                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.64. Presupuesto total de NH <sub>3</sub> emitido previo a la adopción generalizada del amoníaco verde como combustible. . . . .                                                                                                                       | 320 |
| 5.65. Brecha de mitigación para CO <sub>2</sub> . . . . .                                                                                                                                                                                               | 321 |
| 5.66. Emisiones evitadas de N <sub>2</sub> O (111,4 toneladas). El área refleja un beneficio modesto pero sostenido a largo plazo. . . . .                                                                                                              | 321 |
| 5.67. Emisiones acumuladas evitadas de SO <sub>2</sub> . Beneficio directo de la transición hacia vectores energéticos libres de azufre. . . . .                                                                                                        | 322 |
| 5.68. Brecha de mitigación para NO <sub>x</sub> . Destaca la notable cifra de más de 405 mil toneladas evitadas. . . . .                                                                                                                                | 322 |
| 5.69. Mitigación acumulada de PM <sub>2.5</sub> . Se previenen más de 15.400 toneladas de partículas finas altamente nocivas. . . . .                                                                                                                   | 322 |
| 5.70. Brecha de mitigación para PM <sub>10</sub> , mostrando un beneficio acumulado de 16.779,9 toneladas. . . . .                                                                                                                                      | 322 |
| 5.71. Emisiones evitadas de Carbono Negro (BC), fundamentales para atenuar el forzamiento radiativo local. . . . .                                                                                                                                      | 323 |
| 5.72. Brecha de mitigación para CO. El incremento en la calidad de combustión evita más de 35 mil toneladas. . . . .                                                                                                                                    | 323 |
| 5.73. Emisiones acumuladas evitadas de NMVOC (11.122,7 toneladas) en la transición 2023-2050. . . . .                                                                                                                                                   | 323 |
| 5.74. Brecha de mitigación para NH <sub>3</sub> . Representa la disminución base previo a la masificación del amoníaco como combustible marino. . . . .                                                                                                 | 323 |
| 5.75. Evaluación multidimensional del impacto ambiental al 2050. El escenario Chile Acelerado (E5) contrae casi por completo la huella de GEI y contaminantes criterio. . . . .                                                                         | 324 |
| 5.76. Análisis de cascada para la reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> al 2050. Se detalla el peso relativo de la eficiencia, la transición energética y las políticas locales para alcanzar el objetivo Net-Zero. . . . .                         | 325 |
| 5.77. Matriz de calor de la vulnerabilidad por emisiones locales de NO <sub>x</sub> en los diez principales puertos chilenos al 2050. La intensidad del color refleja la concentración de externalidades negativas bajo escenarios de inacción. . . . . | 326 |
| 5.78. Trayectorias de emisión de CO <sub>2</sub> (2024-2050). Se observa la divergencia entre el escenario base y las distintas alternativas de intervención. . . . .                                                                                   | 328 |
| 5.79. Áreas de mitigación acumulada. El escenario ambicioso logra suprimir más de 83 millones de toneladas respecto a la línea base. . . . .                                                                                                            | 328 |

|                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.80. Hitos de descarbonización. La brecha de mitigación se consolida fuertemente hacia el final del periodo modelado. . . . .                                                                                                                | 329 |
| 5.81. Mejora en la intensidad de carbono operacional, demostrando una caída sostenida en las emisiones por pasajero transportado. . . . .                                                                                                     | 329 |
| 5.82. Panel interactivo general de proyecciones aéreas, detallando los valores absolutos por año bajo múltiples combinaciones de políticas y escenarios simulados. . . . .                                                                    | 329 |
| 5.83. Desempeño relativo de los escenarios. Destaca el nulo aporte del vector .Aislado SAF. <sup>en</sup> la contabilidad directa de dióxido de carbono. . . . .                                                                              | 329 |
| 5.84. Diagrama de cascada (Waterfall) de reducción de emisiones al 2050. Se explicita y evidencia el nulo aporte del SAF bajo la lupa del análisis Tank-to-Wake. . . . .                                                                      | 330 |
| 5.85. Hoja 3 del Dashboard interactivo confeccionado, en donde se presenta el impacto del SAF sobre contaminantes locales. Pese a no reducir el $CO_2$ en vuelo, minimiza radicalmente la expulsión de $SO_x$ y Material Particulado. . . . . | 330 |
| 5.86. Contraste metodológico al 2050. La incorporación del enfoque LCA le otorga al SAF una capacidad de abatimiento de 6,1 Mt de $CO_2$ , comprimiendo severamente las emisiones residuales. . . . .                                         | 332 |
| 5.87. Divergencia temporal entre los enfoques TtW y LCA. La política de combustibles sostenibles salva un presupuesto acumulado de más de 46 millones de toneladas. . . . .                                                                   | 332 |
| 5.88. Trayectorias corregidas de $CO_2$ bajo contabilidad de Ciclo de Vida (70 % de reducción por SAF). El escenario ambicioso logra revertir la inercia del crecimiento de la demanda nacional. . . . .                                      | 332 |
| 5.89. Trayectorias de Material Particulado Fino ( $PM_{2,5}$ ). . . . .                                                                                                                                                                       | 333 |
| 5.90. Desplome proyectado para los Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ). . . . .                                                                                                                                                                       | 333 |
| 5.91. Contención en la liberación de Hidrocarburos (HC). . . . .                                                                                                                                                                              | 333 |
| 5.92. Mapa de calor con la reducción porcentual de contaminantes locales. Se evidencia la efectividad de las distintas estrategias para abatir la toxicidad en el entorno aeroportuario. . . . .                                              | 334 |
| 5.93. Presupuesto de carbono acumulado bajo enfoque TtW. . . . .                                                                                                                                                                              | 335 |
| 5.94. Auditoría acumulada aplicando el enfoque de Ciclo de Vida (LCA) para el SAF. . . . .                                                                                                                                                    | 335 |

# Índice de tablas

|                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.1. Comparación de características y recursos según los niveles metodológicos ( <i>Tiers</i> ) del IPCC. Fuente: Adaptado de [65] . . . . .                                                                                                     | 15  |
| 1.2. Comparativa de ventajas y desventajas de los enfoques <i>top-down</i> y <i>bottom-up</i> . Fuente: Adaptado de Zhao et al. (2017). . . . .                                                                                                  | 17  |
| 1.3. Resumen de variables <i>proxy</i> utilizadas para cada modo de transporte con sus ventajas y limitaciones. Fuente: Adaptado de Crippa et al. (2024). 30                                                                                     |     |
| 1.4. Características y base metodológica de los perfiles temporales CAMS-TEMPO para el transporte vial [39]. . . . .                                                                                                                             | 41  |
| 2.1. Equivalencia de las categorías principales de vehículos en Europa y Chile. HDT denota camión de carga pesada (heavy-duty truck). . . . .                                                                                                    | 64  |
| 2.2. Factores de emisión utilizados para diferentes compuestos en Chile (Parte 1: CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>2,5</sub> ). Los números 0–6 indican las normas Euro, y las letras G y D corresponden a gasolina y diésel. . . . . | 70  |
| 2.3. Factores de emisión utilizados para diferentes compuestos en Chile (Parte 2: BC, CO, VOCs). Los números 0–6 indican las normas Euro, y las letras G y D corresponden a gasolina y diésel. . . . .                                           | 71  |
| 2.4. Fracciones de BC/PM <sub>2,5</sub> para las tecnologías de emisión de vehículos en Chile (Pre-Euro a Euro III/3). . . . .                                                                                                                   | 72  |
| 2.5. Fracciones de BC/PM <sub>2,5</sub> para las tecnologías de emisión de vehículos en Chile (Euro IV/4 a Euro VI/6). . . . .                                                                                                                   | 72  |
| 2.6. Principales aeropuertos de Chile: número de operaciones anuales y rutas domésticas frecuentes. . . . .                                                                                                                                      | 80  |
| 2.7. Principales aeropuertos de Chile: rutas internacionales más frecuentes. .                                                                                                                                                                   | 80  |
| 2.8. Datos de los tipos de embarcación analizados, información de acuerdo a “UK Ship Emissions Inventory” de ENTEC UK. . . . .                                                                                                                   | 85  |
| 2.9. Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo crucero. .                                                                                                                                                                       | 93  |
| 2.10. Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo maniobra. .                                                                                                                                                                     | 93  |
| 2.11. Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo puerto. . .                                                                                                                                                                     | 93  |
| 2.12. Caracterización Geométrica y Topológica de las Fases Marítimas . . . .                                                                                                                                                                     | 111 |
| 2.13. Parámetros principales de los escenarios combinados . . . . .                                                                                                                                                                              | 133 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Parámetros de entrada y valores de referencia operativos por categoría de embarcación. . . . .                                                                                                                              | 189 |
| 3.2. Factores de emisión de referencia según tipo de motor y fase (g/kWh). .                                                                                                                                                     | 190 |
| 3.3. Emisiones portuarias totales por categoría de embarcación (toneladas) año 2023. . . . .                                                                                                                                     | 190 |
| 3.4. Desglose de recaladas y emisiones portuarias por terminal geográfico. .                                                                                                                                                     | 191 |
| 3.5. Distribución temporal de emisiones por fase operativa en recintos portuarios (expresado en kton/año). . . . .                                                                                                               | 192 |
| 3.6. Resumen nacional total de emisiones portuarias (Chile, 2023). . . . .                                                                                                                                                       | 192 |
| 3.7. Extracto de la caracterización espacial y cinemática de rutas marítimas nacionales. . . . .                                                                                                                                 | 193 |
| 3.8. Evolución histórica de frecuencias de recalada (viajes anuales) por ruta seleccionada. . . . .                                                                                                                              | 193 |
| 3.9. Progresión de emisiones de CO2 (toneladas) en fase crucero y consolidado de compuestos criterio. . . . .                                                                                                                    | 194 |
| 3.10. Ranking de las 10 rutas marítimas con mayor impacto en emisiones de CO2. . . . .                                                                                                                                           | 195 |
| 3.11. Serie de tiempo de emisiones globales del sector marítimo nacional por contaminante (2014-2023). . . . .                                                                                                                   | 196 |
| 3.12. Corpus documental y bases de datos empleadas en la calibración del modelo de emisiones. . . . .                                                                                                                            | 196 |
| 4.1. Perfiles de distribución temporal para el transporte interurbano (%). Se evidencia la marcada estacionalidad estival en vehículos particulares y motocicletas frente a la estabilidad del transporte de carga pesada. . . . | 233 |
| 4.2. Fragmento de la matriz de datos crudos empleada para la modelación. Muestra los factores de distribución fraccional estructurados por hora y tipología de día. . . . .                                                      | 237 |
| 4.3. Reporte de auditoría y balance de masa para la validación del algoritmo de desagregación temporal (Periodo 2023). . . . .                                                                                                   | 252 |

# **1. Estado del Arte**

## **1.1. Marco conceptual**

Con el fin de establecer un marco conceptual sólido que sustente el desarrollo metodológico y la correcta interpretación de los resultados de esta tesis, se definen a continuación los principales conceptos asociados a emisiones de gases de efecto invernadero, mitigación climática, descarbonización y modelación del transporte, los cuales resultan fundamentales para el desarrollo de esta investigación y para el correcto análisis de escenarios hacia la carbono neutralidad en Chile.

### **Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Los gases de efecto invernadero corresponden a aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, de origen natural o antropogénico, que poseen la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja, contribuyendo al fenómeno del efecto invernadero [30]. Este proceso permite mantener una temperatura media compatible con la vida en el planeta; sin embargo, el incremento sostenido en las concentraciones de GEI producto de la actividad humana ha intensificado este fenómeno, generando un aumento en la temperatura media global con impactos significativos sobre los sistemas naturales y socioeconómicos [85]. Entre los principales GEI se encuentran el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los gases fluorados.

### **Mitigación de GEI**

La mitigación del cambio climático se refiere al conjunto de políticas, acciones y estrategias destinadas a reducir las emisiones de GEI o a incrementar su remoción mediante sumideros naturales o tecnológicos. Estas acciones pueden enfocarse tanto en la reducción del uso de combustibles fósiles, mejoras en eficiencia energética, como en transformaciones estructurales de los sistemas productivos y de transporte. El objetivo principal de la mitigación es limitar el aumento de la temperatura global y sus impactos asociados [84,85].

## **Reducción de GEI**

La reducción de emisiones de GEI se define como la disminución cuantificada que resulta de comparar las emisiones asociadas a una línea base con aquellas obtenidas tras la implementación de un proyecto o medida de mitigación [31]. En Chile, este concepto se encuentra normado a través de la NCh 3300:2014, la cual define la reducción como la variación calculada entre un escenario sin proyecto y el escenario con aplicación de medidas de mitigación [17].

## **Descarbonización**

La descarbonización corresponde al proceso mediante el cual los países, sectores productivos, organizaciones o individuos orientan sus actividades hacia la eliminación progresiva de las emisiones de carbono, principalmente aquellas asociadas al consumo energético, procesos industriales y sistemas de transporte [84]. Este proceso implica una transición desde matrices energéticas basadas en combustibles fósiles hacia fuentes renovables, electrificación de la demanda y adopción de tecnologías de bajas emisiones.

## **Carbono neutral**

La condición de carbono neutral se alcanza cuando las emisiones netas de GEI asociadas a una organización, producto, servicio o territorio son iguales a cero dentro de un periodo de tiempo determinado. Según la norma ISO 14068-1, esta condición se logra mediante la aplicación secuencial de acciones de reducción y remoción de emisiones, complementadas, cuando sea necesario, con mecanismos de compensación a través de créditos de carbono certificados [32]. Este concepto es clave en el contexto de las estrategias nacionales y compromisos climáticos de Chile [15, 16].

## **Inventario de emisiones de GEI**

Un inventario de emisiones corresponde a la cuantificación sistemática de las emisiones y remociones de GEI generadas por fuentes específicas dentro de un ámbito territorial y temporal definido. El IPCC establece directrices metodológicas para su elaboración, asegurando consistencia, transparencia y comparabilidad entre países [65]. En el sector transporte, el inventario se desagrega por tipo de vehículo, tecnología y combustible.



## **Línea base y escenarios de mitigación**

La línea base de emisiones representa la trayectoria de evolución de las emisiones en ausencia de nuevas políticas o medidas adicionales de mitigación. A partir de esta referencia se construyen escenarios alternativos que incorporan supuestos sobre innovación tecnológica, electrificación del transporte, eficiencia energética y cambios en la demanda [84, 85]. La comparación entre estos escenarios permite cuantificar el potencial de reducción alcanzable.

## **Factores de emisión**

Los factores de emisión son coeficientes que relacionan una actividad determinada con la cantidad de contaminante emitido, expresados, por ejemplo, en gramos de CO<sub>2</sub> equivalente por kilómetro recorrido o por unidad de energía consumida. Estos factores se encuentran normalizados en las directrices metodológicas del IPCC y en modelos del sector transporte [65].

## **Vehículos-kilómetro recorridos (VKT)**

El VKT es un indicador de actividad que representa la distancia total recorrida por los vehículos en una red vial durante un periodo determinado. Este parámetro es fundamental en los modelos de estimación de emisiones del transporte, dado que, junto con los factores de emisión, permite calcular las emisiones totales por categoría vehicular y territorio [54, 56]. Su evolución depende del crecimiento económico, planificación territorial y demanda de transporte.

## **Co-beneficios en calidad del aire**

Las medidas orientadas a la reducción de GEI en el sector transporte generan co-beneficios sobre la calidad del aire, al disminuir simultáneamente las emisiones de contaminantes locales como material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV), contribuyendo positivamente a la salud pública [85].

## **Neutralidad de carbono a nivel país y sectorial**

La neutralidad de carbono a nivel nacional implica que las emisiones netas de GEI de un país se igualan a cero en un año objetivo, generalmente 2050. En el caso de Chile,

este compromiso se formaliza a través de la Política Energética Nacional y la Ley Marco de Cambio Climático [15, 16]. Sectores intensivos en emisiones, como el transporte, deben definir trayectorias específicas de reducción coherentes con esta meta.

### **Desagregación espacial y temporal de emisiones**

La desagregación espacial de emisiones consiste en distribuir las emisiones agregadas sobre una grilla o red vial, permitiendo representar su localización geográfica con alta resolución. De forma complementaria, la desagregación temporal permite asignarlas a escalas horarias, diarias o estacionales, lo que resulta esencial para estudios de calidad del aire y modelos de dispersión atmosférica [65].

### **Huella de carbono del transporte**

La huella de carbono del transporte corresponde al total de emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida completo de los sistemas de movilidad, incluyendo emisiones directas por combustión y aquellas generadas en la producción de energía y combustibles [33]. Este enfoque es especialmente relevante para evaluar tecnologías como la electromovilidad y el hidrógeno verde.

Este conjunto de definiciones proporciona el marco conceptual necesario para el desarrollo de la tesis, orientada a la estimación y proyección de emisiones del transporte en Chile bajo distintos escenarios de mitigación y a su integración en análisis de calidad del aire y carbono neutralidad hacia 2050.

## **1.2. Rol del transporte en el cambio climático**

Como bien se sabe, el cambio climático es consecuencia directa del aumento sostenido de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), asociado al uso intensivo de combustibles fósiles y también a cambios en el uso de la tierra [104]. De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), las emisiones antropogénicas netas de GEI alcanzaron en 2019 aproximadamente 59 Gt $\text{CO}_2$ -eq, como se muestra en la Figura 1.1, lo que representa un incremento sustantivo respecto de los niveles preindustriales y consolida una trayectoria incompatible con la limitación del calentamiento global a 1,5–2 °C [105].

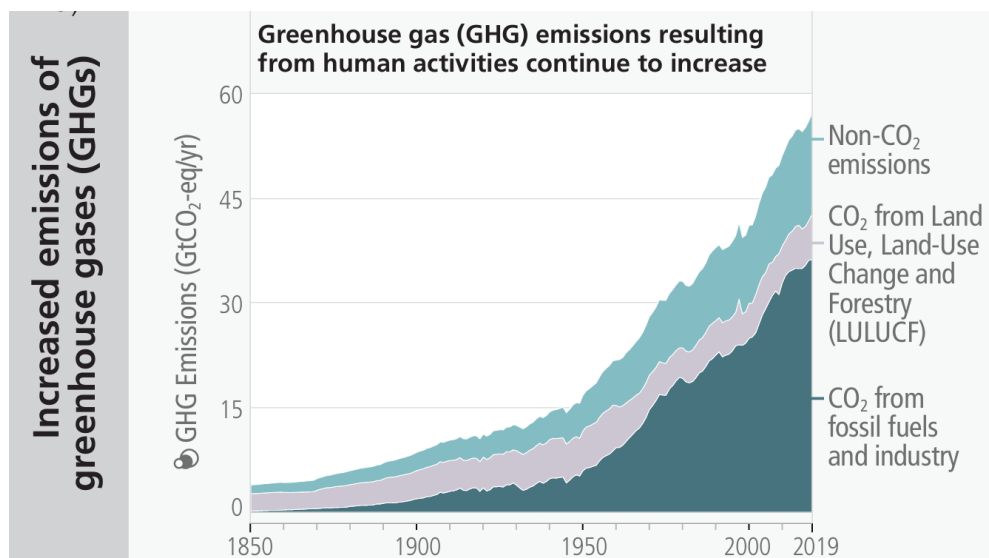


Figura 1.1: Evolución de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico entre 1850 y 2019. Fuente: [105]

En las últimas décadas, la comunidad científica ha consolidado un consenso robusto e irrefutable respecto a la alteración del sistema climático global. Analizando los registros históricos, es clara la tendencia al alza sostenida en las temperaturas medias del planeta. Tal como se aprecia en la Figura 1.2, la temperatura superficial global ha experimentado un incremento de aproximadamente 1,1°C durante la década de 2011-2020 en comparación con el periodo de referencia preindustrial (1850-1900), la anomalía térmica representa el periodo multicentenario más cálido de los últimos 100.000 años, marcando una disrupción sin precedentes en la estabilidad climática de la Tierra.

Este incremento térmico anómalo está fuertemente acoplado a la modificación artificial de la composición de la atmósfera. Desde los albores de la Revolución Industrial en 1850, las concentraciones de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) han aumentado a un ritmo acelerado. La Figura 1.3 detalla esta evolución, mostrando que para el año 2019, la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) alcanzó las 410 partes por millón (ppm). De manera simultánea, otros gases de alto potencial de calentamiento como el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) registraron concentraciones de 1866 partes por billón (ppb) y 332 ppb, respectivamente.

Para comprender a cabalidad la mecánica detrás de este fenómeno, es fundamental analizar los distintos forzantes climáticos y su contribución neta al calentamiento observado. La evidencia atribuye de forma inequívoca el aumento de temperatura a las actividades humanas, es decir, el calentamiento es producto de las emisiones antro-

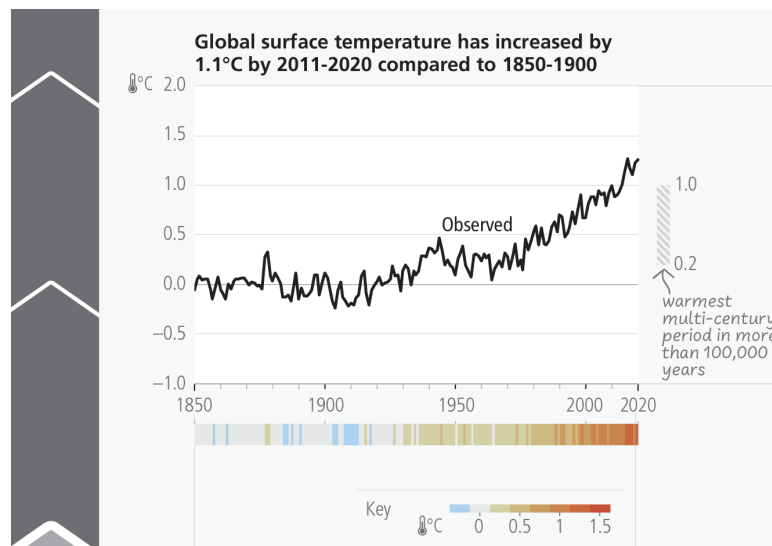


Figura 1.2: Evolución histórica de la temperatura superficial global. Se observa un incremento sostenido que culmina en un alza de 1,1°C para el periodo 2011-2020 respecto a los niveles preindustriales. Fuente: [105]

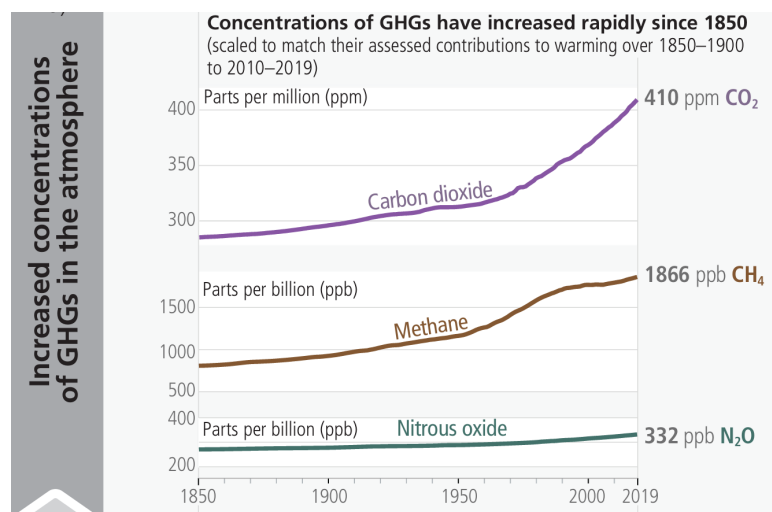


Figura 1.3: Crecimiento acelerado de las concentraciones atmosféricas de los principales Gases de Efecto Invernadero (Dióxido de carbono, Metano y Óxido nitroso) desde 1850 hasta 2019. Fuente: [104]

pogénicas. Como se desglosa en la Figura 1.4, la influencia humana total es el motor dominante de la variación térmica. Específicamente, las emisiones de GEI bien mezclados han inducido un calentamiento teórico cercano a los 1,5°C. No obstante, este efecto ha sido muy parcialmente mitigado o "enmascarado" (en aproximadamente -0,4°C) por el enfriamiento derivado de otros impulsores de origen antrópico, principalmente la emisión de aerosoles. En claro contraste, los forzantes de origen natural como la variabilidad solar, la actividad volcánica y la propia variabilidad interna del clima, han tenido una incidencia estadística prácticamente nula en el balance energético global durante este periodo.

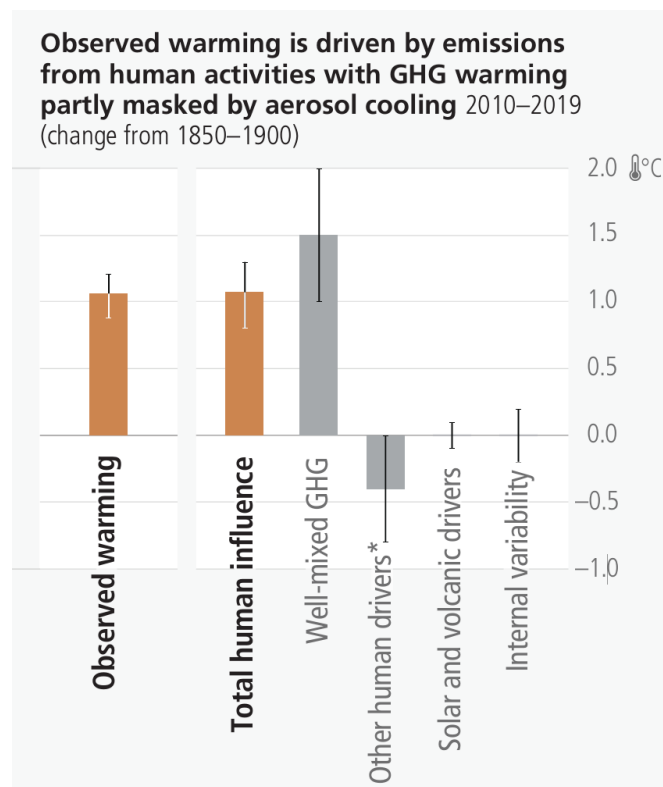


Figura 1.4: Atribución del calentamiento global (2010-2019). El gráfico evidencia la dominancia absoluta de las emisiones antrópicas, donde el calentamiento generado por los GEI es contrarrestado parcialmente por el efecto de enfriamiento de los aerosoles, con una contribución natural nula. Fuente: [85]

A escala global, el transporte representa alrededor de un 15 % de las emisiones antropogénicas totales de GEI y alrededor de un 23 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía [56, 85]. En 2019, las emisiones directas del sector transporte se estimaron en torno a 8,7–8,9 GtCO<sub>2</sub>-eq, aumentando desde aproximadamente 5 GtCO<sub>2</sub>-

eq en 1990, lo que implica un crecimiento cercano al 75 % en tres décadas [85]. Entre 2010 y 2019, las emisiones del sector crecieron a una tasa promedio de alrededor de 1,8 % anual, una de las más altas entre los grandes sectores emisores [85]. La estructura interna de las emisiones del transporte está fuertemente dominada por el transporte terrestre, especialmente por carretera. El AR6 estima que alrededor de un 70 % de las emisiones directas del sector proviene de vehículos livianos y pesados que circulan por carreteras, mientras que la aviación, el transporte marítimo y el transporte ferroviario explican aproximadamente un 12 %, 11 % y 1 %, respectivamente [85]. Esta distribución refleja el alto grado de dependencia del sistema de transporte mundial respecto del petróleo y sus derivados, utilizados tanto en el transporte de pasajeros como de carga.

Históricamente, el crecimiento de las emisiones antropogénicas no ha sido uniforme, concentrándose de manera particular en aquellas regiones que experimentaron procesos de industrialización temprana. Como se aprecia en la figura 1.5, existe una disparidad significativa tanto en la contribución histórica acumulada como en las emisiones per cápita actuales. El panel izquierdo de la figura ilustra que, en el período comprendido entre 1850 y 2019, Norteamérica y Europa han sido responsables del 23 % y 16 % de las emisiones netas acumuladas de CO<sub>2</sub> de origen humano, respectivamente. Sin embargo, al observar el panorama del año 2019 (panel derecho), se evidencia un contraste importante, ya que si bien Norteamérica mantiene una de las tasas de emisiones per cápita más altas a nivel global (rozando las 20 tCO<sub>2</sub>-eq por persona), regiones como Asia Oriental dominan en términos absolutos debido a su vasta población. Esto ocurre a pesar de que la huella per cápita de los habitantes de Asia Oriental es considerablemente menor que la de los países norteamericanos.

Por otro lado, la dinámica temporal de las últimas tres décadas revela cambios sustanciales en la matriz global de emisiones. La figura 1.6 detalla la evolución de las emisiones netas antropogénicas de GEI desde el año 1990 hasta el 2019. Durante este período, las emisiones totales experimentaron un incremento sostenido, pasando de 38 GtCO<sub>2</sub>-eq/año a 59 GtCO<sub>2</sub>-eq/año. Este crecimiento acelerado ha sido impulsado mayoritariamente por Asia Oriental, cuya participación en las emisiones globales aumentó drásticamente del 13 % al 27 %. En contraste, regiones que históricamente lideraron las emisiones, como Europa y Norteamérica, han visto disminuir su participación porcentual en el mismo margen de tiempo (Europa, por ejemplo, se redujo del 16 % al 8 %). Esta tendencia refleja las recientes transiciones hacia matrices energéticas menos intensivas en carbono en los países desarrollados, así como la externalización y reconfiguración de la producción industrial hacia el continente asiático.

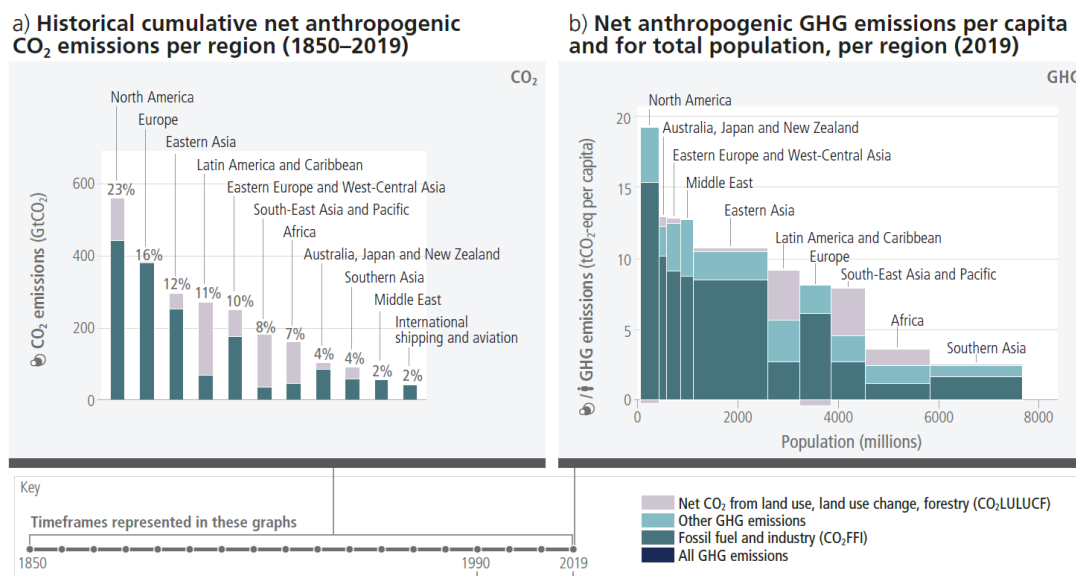


Figura 1.5: Emisiones históricas acumuladas de CO<sub>2</sub> por región (1850-2019) y distribución de emisiones netas de GEI per cápita frente a la población total regional en el año 2019. Fuente: [85]

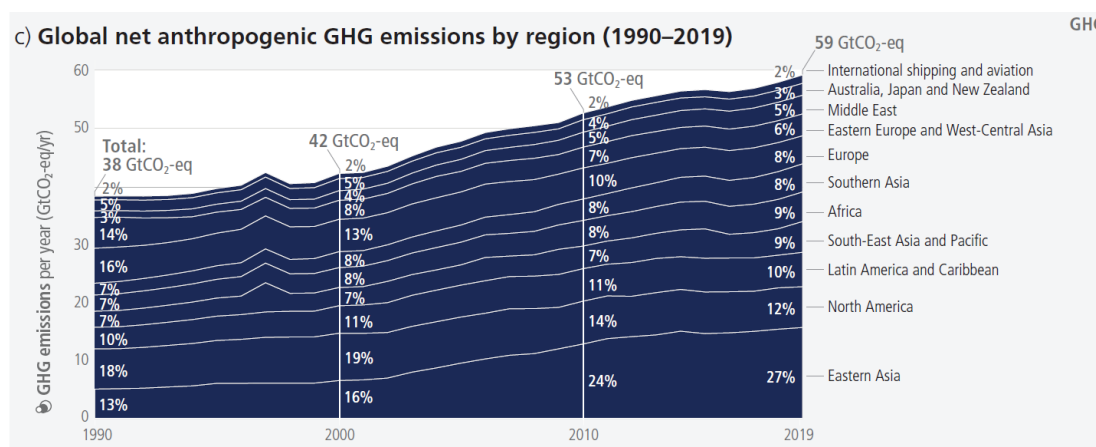


Figura 1.6: Evolución temporal de las emisiones globales netas antropogénicas de GEI, segmentadas por región, entre los años 1990 y 2019. Fuente: [54]

Datos recientes de la Agencia Internacional de Energía (IEA) muestran que las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía alcanzaron en 2022 un máximo histórico de aproximadamente 36,8 GtCO<sub>2</sub> [5]. Dentro de este total, las emisiones del transporte se estiman cercanas a 8 GtCO<sub>2</sub>, con un aumento superior a 250 MtCO<sub>2</sub> respecto de 2021, impulsado principalmente por la recuperación de la aviación tras la pandemia de COVID-19 [54, 56]. Aunque la penetración de tecnologías de bajas emisiones, como los vehículos eléctricos, ha comenzado a moderar el crecimiento de las emisiones en algunos segmentos y países, el balance global del sector sigue siendo de expansión, especialmente en economías emergentes con altas tasas de motorización y crecimiento de la demanda de transporte.

Por otra parte, el rol del transporte en el cambio climático no se limita únicamente a su contribución cuantitativa a las emisiones globales, sino también a ciertas características, estructurales que dificultan su descarbonización. En primer lugar, se tiene que el sector presenta una fuerte inercia tecnológica e institucional, dado que la infraestructura de transporte (redes viales, puertos, aeropuertos, teinales de carga) y el parque vehicular tienen largos ciclos de vida, lo que genera un efecto de “encerramiento” (lock-in) en pautas de movilidad y tecnologías basadas en combustibles fósiles. La sustitución de esta infraestructura y flota requeriría inversiones significativas y marcos regulatorios estables, así como cambios en los patrones de uso del suelo y en la organización territorial de las ciudades [55]. En segundo lugar, desde un punto de vista econométrico, la demanda de transporte se encuentra estrechamente ligada al crecimiento económico, a la urbanización y a los cambios en los estilos de vida. El aumento de los ingresos y la expansión de las áreas metropolitanas suelen traducirse en mayores distancias recorridas, mayor motorización y, en ausencia de políticas de mitigación, en un incremento de las emisiones por pasajero-kilómetro o toneda-kilómetro transportada. Esta relación es especialmente marcada en el transporte de carga por carretera, en donde la expansión del comercio y de las cadenas logísticas globales ha impulsado inherentemente las emisiones de vehículos pesados [85].

En tercer lugar, el transporte depende casi exclusivamente de derivados del petróleo. A pesar del crecimiento reciente de la electromovilidad y del interés en combustibles alternativos (biocombustibles avanzados, hidrógeno, e-fuels, etc.), la participación de estas opciones en la matriz energética del transporte continúa siendo limitada a escala global [54,56]. La alta densidad energética de los combustibles fósiles, su infraestructura de suministro ya instalada y operando de buena manera, y sus costos relativos todavía competitivos frente a muchas alternativas dificultan el reemplazo rápido de estas fuentes



contaminantes.

La importancia del transporte en el cambio climático también se manifiesta en su interacción con otros impactos ambientales y sociales. Además de contribuir al aumento de las concentraciones de GEI, el sector es una fuente relevante de contaminantes atmosféricos locales, tales como material particulado (MP), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COV), que afectan la calidad del aire y tienen implicancias directas en la salud de la población circundante. Inventarios de emisiones de alta resolución desarrollados recientemente muestran que, en muchos contextos urbanos, el transporte es responsable de una fracción mayoritaria de las emisiones de  $\text{NO}_x$  y una proporción significativa del MP fino [65, 85]. De este modo, las políticas de mitigación climática en el transporte generan co-beneficios importantes en términos de salud pública y reducción de costos sanitarios. Es por este motivo que el IPCC destaca que alcanzar las metas del Acuerdo de París requiere transformaciones profundas en los sistemas de transporte, incluyendo reducciones rápidas y sostenidas de sus emisiones [84, 85]. Los escenarios compatibles con un calentamiento limitado a 1,5 °C muestran que, para mediados de siglo, las emisiones del transporte deben disminuir significativamente respecto de los niveles actuales, combinando medidas de eficiencia energética, cambios modales hacia modos de transporte más sostenibles, electrificación masiva basada en matrices eléctricas bajas en carbono y despliegue de combustibles alternativos de bajas emisiones para segmentos difíciles de electrificar, como el transporte de carga de larga distancia, el transporte marítimo y la aviación [84, 85].

A modo de síntesis y de acuerdo a lo mencionado anteriormente, el transporte ocupa un rol central en el cambio climático por su peso creciente en las emisiones globales, por la fuerte dependencia que mantiene de los combustibles fósiles y por la complejidad de transformar la infraestructura y los patrones de movilidad existentes. Al mismo tiempo, constituye un sector clave para la obtención de reducciones significativas de emisiones y co-beneficios en calidad del aire, especialmente en entornos urbanos. En este contexto, disponer de herramientas robustas para cuantificar las emisiones del transporte con alta resolución espacial y temporal, y evaluar el impacto de distintas medidas de mitigación en el horizonte 2050, resulta fundamental para la formulación y seguimiento de políticas climáticas y de transporte coherentes con las metas de carbono neutralidad.

### 1.3. Introducción a los Inventarios de Emisiones

Los inventarios de emisiones atmosféricas constituyen herramientas fundamentales para la evaluación de la calidad del aire, el diseño de políticas de mitigación del cambio climático y la comprensión de los impactos de las actividades humanas sobre el medio ambiente [23]. En el ámbito del sector transporte, que como se mencionó anteriormente representa una de las fuentes más significativas de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos tanto a nivel global como regional, la necesidad de desarrollar inventarios de alta resolución espacial y temporal se ha convertido en un requerimiento cada vez más apremiante para la comunidad científica y los tomadores de decisiones [59,61].

A nivel mundial, el sector transporte es responsable de aproximadamente el 15 % de las emisiones totales de GEI y alrededor del 23 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía [4]. En América Latina y el Caribe, la situación es aún más pronunciada, ya que el transporte representa aproximadamente el 39 % de las emisiones totales de GEI de la región, posicionándose como la fuente dominante de emisiones [103]. En Chile específicamente, como se puede observar en la Figura 1.7, el transporte consume cerca del 40 % de la energía final y dos tercios de los productos derivados del petróleo del país [52], lo que lo convierte en un sector estratégico para las políticas de mitigación climática.

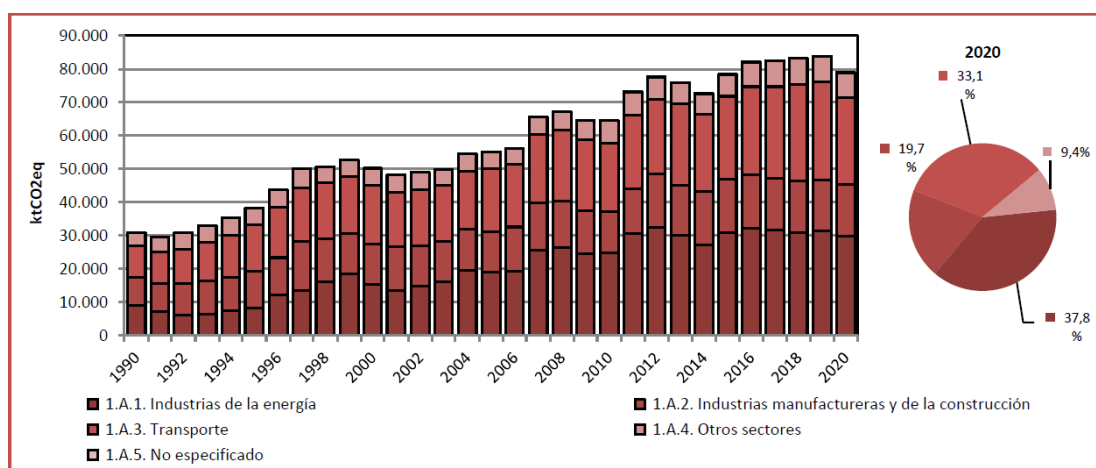


Figura 1.7: Actividades de quema de combustible: emisiones de GEI (kt CO<sub>2</sub> eq) por subcategoría, serie 1990-2020. Fuente: [15]

Chile se ha posicionado como líder regional en materia de acción climática, siendo el primer país latinoamericano en comprometerse a alcanzar la neutralidad de carbono

para el año 2050 [6][7]. La Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) actualizada del país establece una meta de emisiones absolutas anuales de 95 MtCO<sub>2</sub>eq para 2030, lo que implica una reducción de aproximadamente el 11 % respecto a los niveles de 2020 [6]. En el sector transporte, las metas incluyen, entre otras cosas, la electrificación total de las ventas de vehículos livianos nuevos para 2035 y la integración de hidrógeno verde en el 71 % del transporte de carga para 2050 [2, 76]. Esto es una meta ambiciosa dada la complejidad inherente al sistema de transporte, que abarca los modos terrestre, marítimo y aéreo, ya que cada uno cuenta con patrones espaciales y temporales de actividad distintivos, exige el desarrollo de metodologías sofisticadas para estimar, desagregar espacial y temporalmente, y proyectar las emisiones asociadas. La desagregación espacial permite identificar áreas críticas de concentración de contaminantes, diseñar intervenciones localizadas y evaluar con mayor precisión los impactos sobre la salud pública y los ecosistemas [38, 90]. Por su parte, la desagregación temporal posibilita la captura de la variabilidad estacional, semanal y horaria de las emisiones, aspecto fundamental para la modelación de episodios de contaminación atmosférica y la evaluación de la exposición poblacional [12, 39].

En este contexto, las siguientes secciones del estado del arte tienen como objetivo revisar de manera exhaustiva las metodologías, herramientas y enfoques más relevantes para la estimación de emisiones del sector transporte, las técnicas de desagregación espacial y temporal encontrados en la literatura, y los métodos de proyección de emisiones al horizonte 2050. Se presta especial atención a las aplicaciones desarrolladas en Chile y otros países de América Latina, así como a los estándares internacionales establecidos por organizaciones como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA/EMEP), la Organización Marítima Internacional (IMO) y la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), entre otras. Esta revisión proporciona la base conceptual y metodológica sobre la cual se sustenta la investigación desarrollada en esta tesis.

## 1.4. Metodologías de Estimación de Emisiones del Sector Transporte

### 1.4.1. Fundamentos Metodológicos: Nivel de Actividad y Factores de Emisión

La metodología fundamental para la estimación de emisiones del sector transporte se sustenta en la multiplicación ponderada del nivel de actividad por factores de emisión específicos para cada modo de transporte, tipo de vehículo, tecnología y contaminante [23, 24]. Este enfoque, el cual es consistente con las directrices del IPCC 2006 para inventarios nacionales de GEI y con la guía metodológica EMEP/EEA, puede expresarse mediante la ecuación fundamental:

$$E_{i,j,k} = A_{i,j} \times EF_{i,j,k} \quad (1.1)$$

Donde  $E_{i,j,k}$  representa la emisión del contaminante  $k$ , del tipo de vehículo  $j$ , en el segmento  $i$ ;  $A_{i,j}$  corresponde al nivel de actividad expresado en unidades apropiadas según el modo de transporte (vehículos-kilómetro para transporte terrestre, toneladas-milla náutica para transporte marítimo, kilogramos de combustible para aviación); y  $EF_{i,j,k}$  es el factor de emisión correspondiente [24, 81].

Las directrices del IPCC establecen distintos niveles de complejidad creciente (*Tier 1*, *Tier 2* y *Tier 3*) para la estimación de emisiones, dependiendo principalmente de la disponibilidad de datos y la importancia relativa de la categoría de emisión dentro del inventario nacional [23, 62]. El método *Tier 1* es el más básico y utiliza factores de emisión por defecto proporcionados por el IPCC y datos de actividad agregados (típicamente consumo de combustible nacional), este enfoque es el que se usa en inventarios nacionales como el INGEI, luego tenemos el *Tier 2*, el cual emplea factores de emisión específicos del país, mientras que el *Tier 3* es la versión más precisa y recurre a modelos detallados que consideran mayor cantidad de variables como la velocidad de circulación, la composición detallada de la flota vehicular y las condiciones ambientales locales [62, 81]. La elección del nivel metodológico depende fundamentalmente de la disponibilidad de información local y de la contribución relativa de cada categoría al total de emisiones nacionales. En la Tabla 1.1 se presenta una comparación de características y recursos según los niveles metodológicos (*Tiers*) del IPCC.

Tabla 1.1: Comparación de características y recursos según los niveles metodológicos (*Tiers*) del IPCC. Fuente: Adaptado de [65]

| Característica                  | Tier 1 (Nivel 1)                                                                                                                | Tier 2 (Nivel 2)                                                                                                               | Tier 3 (Nivel 3)                                                                                                                |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definición</b>               | Método básico y simplificado. Es el punto de partida para cualquier inventario.                                                 | Método intermedio. Sigue la misma estructura matemática del Nivel 1, pero adaptado a la realidad nacional.                     | Método avanzado, riguroso y altamente detallado. Suele requerir modelación y mediciones directas.                               |
| <b>Factores de Emisión (FE)</b> | Por defecto ( <i>Default</i> ): Utiliza factores genéricos proporcionados por el IPCC (promedios globales o continentales).     | Específicos del país: Factores desarrollados a nivel nacional o regional mediante estudios e investigaciones locales.          | Específicos de la instalación/tecnología: Factores dinámicos, mediciones continuas en chimenea o modelos matemáticos complejos. |
| <b>Datos de Actividad (DA)</b>  | Estadísticas nacionales agregadas a gran escala (ej. venta total de combustible a nivel país) o bases de datos internacionales. | Datos estadísticos detallados y estratificados (ej. consumo por tipo de industria, tecnología o región específica).            | Datos de muy alta resolución espacial (ej. coordenadas exactas, nivel de planta) y temporal (ej. perfiles horarios de emisión). |
| <b>Complejidad y Costo</b>      | Baja. Requiere una cantidad mínima de recursos técnicos, humanos y financieros.                                                 | Media. Exige inversión en estudios de campo y recopilación de datos estadísticos más finos.                                    | Alta. Requiere gran inversión en sistemas de monitoreo avanzado, software de modelación y personal altamente capacitado.        |
| <b>Incertidumbre</b>            | Alta. Al usar promedios globales, el margen de error respecto a la realidad local es grande.                                    | Moderada. Al aterrizar los datos al contexto local, la precisión mejora significativamente.                                    | Baja. Es el nivel más exacto posible, reflejando las condiciones operacionales reales.                                          |
| <b>Uso Recomendado</b>          | Países con recursos limitados o para estimar categorías de fuentes de emisión que no son clave (poco significativas).           | Recomendado para Categorías Clave ( <i>Key Categories</i> ) en países que tienen la capacidad de desarrollar factores locales. | Categorías clave de gran impacto, industrias altamente reguladas o países con infraestructura científica avanzada.              |

### 1.4.2. Enfoques Top-Down y Bottom-Up

En la literatura se distinguen dos aproximaciones fundamentales para el desarrollo de inventarios de emisiones del sector transporte: el enfoque descendente (*top-down*) y el enfoque ascendente (*bottom-up*), cada uno con ventajas y limitaciones específicas que determinan su aplicabilidad según el contexto y los objetivos del estudio [8, 41, 115].

#### Enfoque Top-Down

Comenzando con el enfoque *top-down*, este parte de estadísticas agregadas a nivel nacional o regional, datos como por ejemplo el consumo total de combustible, ventas de energía o datos macroeconómicos, y las desagrega utilizando variables *proxy* o indicadores de sustitución para distribuir las emisiones en el espacio y el tiempo deseado [8, 41]. Este enfoque presenta la ventaja de ser consistente con las estadísticas energéticas nacionales y de requerir considerablemente un menor volumen de datos detallados, lo que facilita en gran medida su aplicación en países con limitada infraestructura de monitoreo. Sin embargo, una de las contras que tiene es que puede introducir incertidumbres significativas en muchos aspectos, incluyendo la distribución espacial, particularmente a resoluciones espaciales finas, donde la relación entre los *proxies* utilizados y las emisiones reales puede debilitarse considerablemente [98, 115]. En el contexto de los inventarios globales, la base de datos EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) constituye el ejemplo más prominente de enfoque *top-down* aplicado a escala global. EDGAR v8.0 proporciona mapas de emisiones con resolución de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  para todos los países del mundo, obtenidos mediante la desagregación de totales nacionales utilizando *proxies* espaciales de alta resolución específicos por sector [13]. Los *proxies* empleados incluyen información georeferenciada de fuentes puntuales, redes de carreteras, trayectorias de embarcaciones y aeronaves, áreas pobladas e instalaciones industriales [13].

#### Enfoque Bottom-Up

Ahora respecto al enfoque *bottom-up*, este construye el inventario desde las fuentes individuales de emisión, utilizando información precisa y detallada, incluyendo información sobre la ubicación, las características técnicas y el nivel de actividad de cada fuente emisora [38, 69]. Para el sector transporte, esto implica conocer los flujos vehiculares por segmento vial, las velocidades de circulación, la composición de la flota vehicular

por categoría y tecnología, y aplicar factores de emisión dependientes de estas variables. Este enfoque proporciona una precisión mucho mayor en la distribución espacial y temporal de las emisiones, pero requiere un volumen sustancial de datos específicos y puede ser bastante intensivo en recursos computacionales y de tiempo [38,69].

Por otra parte, estudios comparativos han demostrado que la elección entre enfoques *top-down* y *bottom-up* tiene implicaciones significativas en la precisión del inventario, particularmente en función de la resolución espacial requerida como se muestra en la Tabla 1.2. Zhao et al. (2017), en un estudio realizado para la provincia de Hebei en China, encontraron que a resoluciones superiores a 0,25° (aproximadamente 25 km), ambos enfoques producen resultados comparables, sin embargo, a resoluciones más finas, aparecen sesgos significativos en los inventarios basados en *proxies*: sobreestimación en centros urbanos y subestimación en zonas suburbanas e industriales periféricas [98,115]. Este hallazgo subraya la importancia de seleccionar cuidadosamente el enfoque metodológico en función de la resolución espacial objetivo del inventario.

Tabla 1.2: Comparativa de ventajas y desventajas de los enfoques *top-down* y *bottom-up*. Fuente: Adaptado de Zhao et al. (2017).

| Característica             | Enfoque <i>Top-Down</i>                 | Enfoque <i>Bottom-Up</i>          |
|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Datos requeridos</b>    | Agregados (nacionales/regionales)       | Detallados (fuentes individuales) |
| <b>Resolución espacial</b> | Limitada, dependiente de <i>proxies</i> | Alta precisión espacio-temporal   |
| <b>Costo y recursos</b>    | Menor esfuerzo computacional            | Intensivo en recursos y tiempo    |
| <b>Sesgo típico</b>        | Sobreestimación en zonas urbanas        | Mayor representatividad local     |

### 1.4.3. Transporte Terrestre

Para la estimación de emisiones del transporte por carretera, la metodología más ampliamente utilizada a nivel internacional es COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport), desarrollada bajo el auspicio de la Agencia Europea de Medio Ambiente y el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea [26, 111]. COPERT constituye la herramienta estándar para el cálculo de

emisiones vehiculares en la Unión Europea y ha sido adoptada o adaptada por numerosos países fuera de Europa, incluyendo varios en América Latina [26, 27].

COPERT aplica la guía metodológica EMEP/EEA para inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos, específicamente el capítulo 1.A.3.b.i-iv correspondiente al transporte por carretera, en su versión 2023 [29, 101]. El modelo estructura el cálculo de emisiones en tres componentes principales, comenzando con las emisiones en caliente (*hot emissions*), producidas durante la operación del motor térmicamente estabilizado, luego las emisiones de arranque en frío (*cold-start emissions*), que ocurren durante el encendido del motor desde temperatura ambiente, y finalmente las emisiones no relacionadas con el escape (*non-exhaust*), que incluyen la evaporación de combustible y el desgaste de neumáticos, frenos y pavimento [26, 27, 111].

La ecuación general de COPERT para las emisiones totales de un contaminante puede expresarse como:

$$E_{\text{pollutant}} = \sum \left[ N_{\text{vehicles}} \times M_{\text{annual}} \times EF_{\text{hot}}(v) + E_{\text{cold-start}} + E_{\text{evap}} \right] \quad (1.2)$$

Donde  $N_{\text{vehicles}}$  es el número de vehículos por categoría,  $M_{\text{annual}}$  es el kilometraje anual promedio,  $EF_{\text{hot}}(v)$  es el factor de emisión en caliente en función de la velocidad promedio de conducción,  $E_{\text{cold-start}}$  son las emisiones adicionales por arranque en frío, y  $E_{\text{evap}}$  son las emisiones evaporativas [26, 27]. Como se mencionó anteriormente, los factores de emisión varían según la categoría vehicular (automóviles, camiones livianos, vehículos pesados, buses, motocicletas), el tipo de combustible (gasolina, diésel, GNC, electricidad, híbridos), la norma de emisión aplicable (Euro 0 a Euro 7 y sus equivalentes), el tamaño del motor, la velocidad promedio de conducción y las condiciones de operación (urbano, rural, autopista) [26, 29, 101]. Un diagrama simplificado de la metodología COPERT se presenta en la Figura 1.8

Los factores de emisión incorporados en COPERT se basan en datos de mediciones de emisiones en condiciones reales de conducción (*Real Driving Emissions*, RDE), lo que representa una mejora sustancial respecto a versiones anteriores que dependían exclusivamente de ciclos de prueba estandarizados de laboratorio [27, 101]. Esta actualización resulta particularmente relevante dado que las emisiones medidas en condiciones reales pueden diferir significativamente de las obtenidas en laboratorio, especialmente para contaminantes como los NO<sub>x</sub> en vehículos diésel y para emisiones evaporativas de COV en vehículos a gasolina.

En Chile, el Ministerio del Medio Ambiente ha desarrollado guías metodológicas



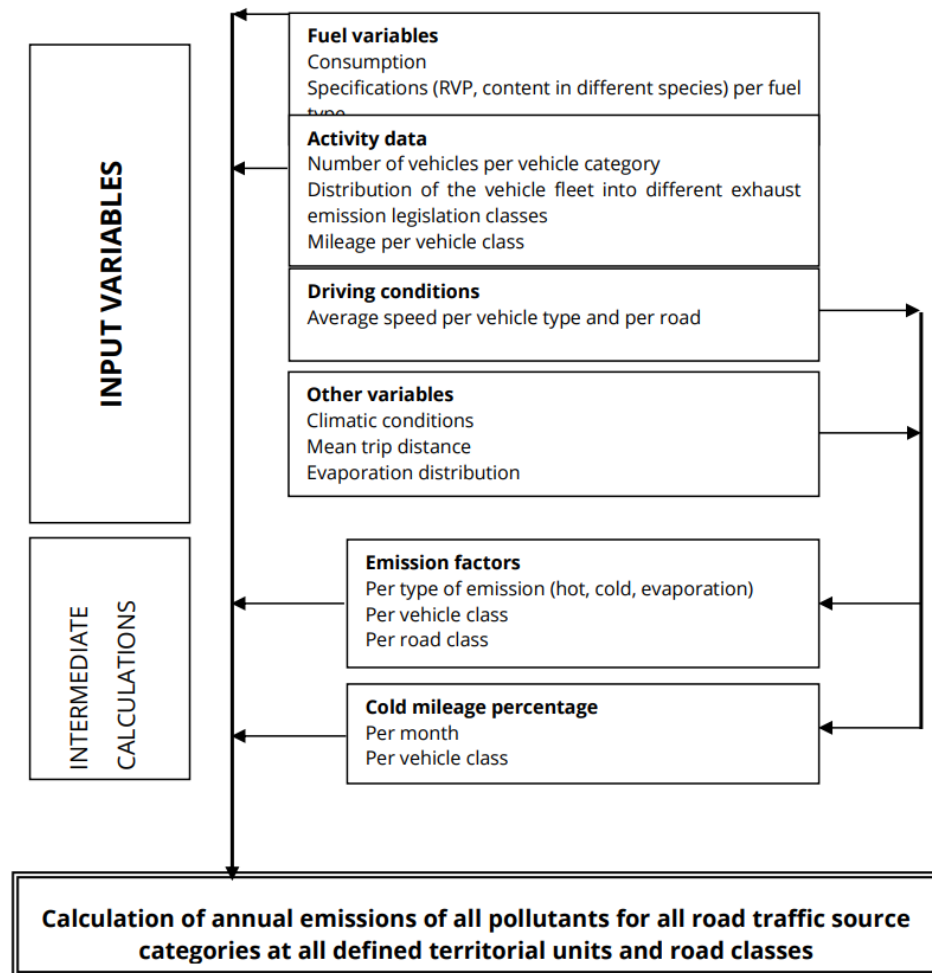


Figura 1.8: Diagrama de flujo de la metodología COPERT mostrando los *inputs* y *outputs*. Fuente: [106]

para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes móviles que se basan en la metodología COPERT adaptada al contexto local [78]. Algo relevante es que estas guías distinguen entre ciudades que disponen de modelos de transporte (donde se aplica una metodología *bottom-up* detallada) y ciudades sin modelo de transporte (donde se recurre a una metodología *top-down* simplificada) [78]. El inventario de alta resolución de emisiones del transporte por carretera de Chile desarrollado por Osses et al. (2022) considera 70 tipos vehiculares, basados en 10 categorías de vehículos, subdivididos en 2 tipos de combustible y 7 estándares de emisión, utilizando factores de emisión derivados de COPERT 5 adaptados a las condiciones locales de las 15 regiones políticas de Chile [86].

#### **1.4.4. COPERT: Estándar Europeo para la Modelación de Factores de Emisión**

Como se mencionó anteriormente, COPERT es la metodología más ampliamente usada a nivel internacional. Respaldado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y la Comisión Europea, el modelo COPERT se posiciona como la herramienta normativa para evaluar las emisiones del parque vehicular en Europa. Esta metodología se encuentra integrada en la Guía de Inventarios EMEP/EEA, consolidándose como un referente técnico a nivel global [41, 115]. Siguiendo con esto, es importante mencionar que el algoritmo de COPERT estima los niveles de emisión segmentando el parque vehicular según el tipo de motorización (diésel, gasolina, gas natural comprimido), la clase de vehículo (livianos, comerciales, pesados, autobuses, motocicletas) y la normativa medioambiental del vehículo (desde Euro 1 hasta Euro 6) [41, 115]. El cálculo se fundamenta en tres componentes operativos esenciales [115]:

- **Emisiones en caliente (Motor Estabilizado):** Constituyen entre el 85 % y el 95 % del total de emisiones generadas en un ciclo de conducción estándar. Su cuantificación se realiza a través de funciones polinómicas o exponenciales dependientes de la velocidad media del flujo vehicular, reflejando cómo la eficiencia termodinámica y la exigencia del motor varían según el régimen de marcha [115].
- **Emisiones por arranque en frío (*Cold Start*):** Se originan cuando el motor opera por debajo de su temperatura óptima de estabilización térmica, etapa en la que la combustión es deficiente y los sistemas de postratamiento (como los catalizadores) aún no son efectivos. Su magnitud está condicionada por la temperatura exterior,

la distancia recorrida y las características tecnológicas del vehículo [115]. En zonas de clima frío o en patrones de viajes urbanos cortos (muy comunes en ciudades chilenas), esta fase puede aportar entre un 15 % y un 25 % del inventario total de emisiones [115].

- **Emisiones evaporativas:** Aplicables de manera exclusiva a los motores a gasolina, corresponden a las fugas de vapores de combustible hacia la atmósfera, tanto durante la conducción como en estado de reposo. Están fuertemente influenciadas por la temperatura ambiente y la duración del estacionamiento, cobrando especial relevancia en zonas cálidas [115].

Diversos estudios de validación han contrastado las estimaciones de COPERT con datos empíricos obtenidos mediante sensores remotos y sistemas de medición a bordo, demostrando una alta precisión para los óxidos de nitrógeno (NOx), aunque con cierta tendencia a sobreestimar el monóxido de carbono (CO) en tecnologías específicas [8]. Investigaciones contemporáneas sugieren que, para optimizar la exactitud del modelo, es fundamental realizar calibraciones locales basadas en campañas de medición experimentales, especialmente en escenarios de tráfico urbano a baja velocidad [98].

#### 1.4.5. MOVES: Modelo Norteamericano de Emisiones Vehiculares

El modelo MOVES, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), constituye el instrumento oficial en Norteamérica para la simulación de emisiones del sector transporte [13, 69]. A diferencia de COPERT, cuya variable independiente fundamental es la velocidad media, MOVES adopta una aproximación microscópica sustentada en la Potencia Específica del Vehículo (VSP, por sus siglas en inglés), la cual se fundamenta en la siguiente relación física [13, 69]:

$$VSP = v \cdot (a + g \cdot \sin(\theta) + \text{coeficientes de fricción y aerodinámica}) \quad (1.3)$$

Donde  $v$  representa la velocidad instantánea (m/s),  $a$  es la aceleración ( $\text{m/s}^2$ ),  $g$  es la aceleración de gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) y  $\theta$  es la pendiente del terreno. Este indicador describe la demanda de potencia por unidad de masa que el motor debe proveer, integrando simultáneamente los esfuerzos inerciales y topográficos [13, 69].

La metodología de MOVES lo que hace básicamente es que discretiza el dominio operativo (VSP vs. velocidad) en celdas o *bins*, calculando tasas de emisión particulares

para cada cuadrante y tipo de vehículo [13, 69]. La herramienta genera factores tanto para contaminantes criterio (NO<sub>x</sub>, CO, PM, COVs), como para gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) y compuestos tóxicos (benceno, formaldehído). Su ejecución demanda una parametrización exhaustiva, en donde se incluye la distribución tecnológica de la flota por año, normativas de los combustibles locales, programas de revisión técnica y perfiles meteorológicos de resolución horaria [13, 69]. Del mismo modo y con el fin de agilizar su implementación en simulaciones de calidad del aire a gran escala, se desarrolló *MOVES-Matrix*, una arquitectura que almacena factores de emisión precalculados para múltiples escenarios, reduciendo el costo computacional de horas a segundos sin sacrificar la rigurosidad matemática [26].

#### **1.4.6. IVE: Modelo Orientado a Países en Vías de Desarrollo**

El Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE, por sus siglas en inglés) fue estructurado específicamente para responder a las necesidades y realidades de las naciones en vías de desarrollo. Una de sus principales fortalezas es la flexibilidad para representar parques automotores altamente heterogéneos, incorporando tecnologías que suelen ser omitidas en los *softwares* de países industrializados [27, 29, 111]. El sistema abarca más de 700 configuraciones vehiculares, desde motocicletas de dos tiempos con potencias ínfimas (3-5 kW) hasta flotas de transporte masivo propulsadas por gas natural comprimido (GNC) [27]. De forma análoga a MOVES, IVE segmenta la operación en *bins* basados en la demanda de potencia específica. El modelo permite ingresar datos empíricos locales, como la distribución real de tecnologías, ciclos de conducción característicos medidos en terreno y patrones de enfriamiento del motor (*soak time*) [27, 111]. La experiencia indica que campañas de recolección de datos de tan solo dos semanas, utilizando sistemas portátiles de medición, suelen ser suficientes para calibrar el modelo con un alto grado de representatividad local [29].

Gracias a su enorme versatilidad, IVE se ha consolidado como la herramienta preferida para la elaboración de inventarios de emisiones en diversas regiones de América Latina, Asia Meridional y otras zonas en desarrollo [27, 29, 111].

### **1.4.7. Guía EMEP/EEA: Referencia Internacional de Factores de Emisión**

Desarrollada de manera colaborativa por el Programa Concertado de Seguimiento y Evaluación (EMEP) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), esta guía constituye el marco técnico internacional estándar para la formulación de inventarios atmosféricos nacionales. Sus metodologías cumplen con los mandatos de la Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia (CLRTAP) y la directriz de techos de emisión de la Unión Europea [78, 101].

El manual técnico EMEP/EEA proporciona los siguientes elementos clave [78, 101]:

- Procedimientos estandarizados y exhaustivos para cuantificar las emisiones de todas las fuentes antropogénicas de importancia.
- Tasas de emisión predeterminadas para una amplia diversidad de contaminantes y clasificaciones tecnológicas.
- Directrices técnicas para ejecutar correctamente la desagregación temporal y espacial de los datos.
- Mecanismos y protocolos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), diseñados para soportar auditorías de terceros.
- Métodos jerárquicos alineados con las directrices del IPCC para el análisis sistemático de la incertidumbre.
- Consideraciones metodológicas para condiciones operativas especiales, como los arranques en frío y los períodos de reposo del motor.

En lo relativo al transporte terrestre, el documento adopta e integra completamente los algoritmos del modelo COPERT mencionado anteriormente, garantizando la homogeneidad y consistencia en los reportes internacionales [86]. El compendio de factores de emisión es revisado y actualizado periódicamente para incorporar el progreso tecnológico y la evidencia empírica más reciente, representando la edición de 2023 el consenso científico más avanzado disponible [101].

#### 1.4.8. Metodología enfocadas en Transporte Marítimo

La cuantificación de las emisiones del transporte marítimo ha experimentado una transformación metodológica significativa durante la última década, impulsada por la creciente disponibilidad de datos del Sistema de Identificación Automática (AIS, *Automatic Identification System*) [66, 114], logrando resultados espaciales con buena precisión como los mostrados en la Figura 1.9. El AIS es un sistema que proporciona información en tiempo real sobre la posición, velocidad, rumbo y características técnicas de las embarcaciones, lo que ha permitido la transición desde enfoques *top-down* basados en estadísticas de consumo de combustible hacia metodologías *bottom-up* de alta resolución espacio-temporal [66, 114]. Los principales modelos internacionales de inventarios de emisiones marítimas basados en AIS incluyen el *Ship Traffic Emission Assessment Model* (STEAM), el *Shipping Emission Inventory Model* (SEIM), el modelo de inventario de emisiones de la Organización Marítima Internacional (IMO) y el *Maritime Transport Environmental Assessment Model* (MariTEAM) [114]. El modelo SEIM, en su versión 2.2 (SEIMv2.2), es uno de los más avanzados y genera inventarios globales de emisiones marítimas con resolución de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  para los años 2013 y 2016-2021, procesando aproximadamente 30 mil millones de registros AIS anuales [114].

La metodología de SEIMv2.2 calcula las emisiones a nivel de embarcación individual y señal por señal de AIS, integrando las posiciones y velocidades en tiempo real con los parámetros técnicos estáticos del buque (tonelaje de peso muerto, potencia del motor principal, velocidad de diseño, etc.) y factores de emisión específicos por tipo de motor y combustible [114]. Las emisiones totales de cada embarcación se calculan sumando las contribuciones de los motores principales, motores auxiliares y calderas de la siguiente manera:

$$E_{i,p} = \sum_{n=1}^{N-1} E_{i,n,p} \quad (1.4)$$

Donde  $E_{i,p}$  representa la emisión total del contaminante  $p$  para la embarcación  $i$ , y  $E_{i,n,p}$  es la emisión del equipo  $n$  (motor principal, auxiliar o caldera). La potencia instantánea del motor se estima a partir de la velocidad real del buque derivada de los datos AIS, aplicando la relación cúbica entre potencia y velocidad característica de la propulsión naval [66, 114].

La Organización Marítima Internacional (IMO) ha establecido la Estrategia 2023 para la Reducción de Emisiones de GEI del transporte marítimo, que introduce indi-

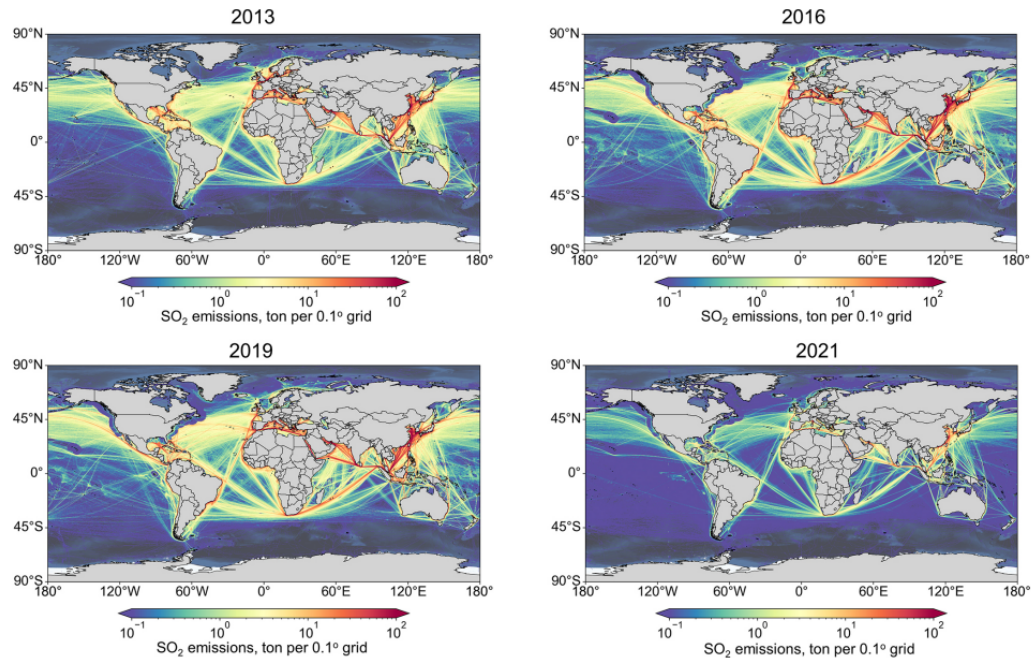


Figura 1.9: Distribución espacial de las emisiones globales de SO<sub>2</sub> de los buques en diferentes años. Fuente: [114]

cadore clave como el Índice de Eficiencia Energética de Buques Existentes (EEXI) y el Indicador de Intensidad de Carbono (CII) [57]. El CII vincula las emisiones de CO<sub>2</sub> con el trabajo de transporte realizado como se muestra en la siguiente relación:

$$CII = \frac{\text{Emisiones de CO}_2 \text{ [toneladas]}}{\text{Trabajo de transporte [toneladas-millas náuticas]}} \quad (1.5)$$

La implementación de estos indicadores, junto con los requerimientos del Cuarto Estudio de GEI de la IMO (2020), ha generado nuevas fuentes de datos para la verificación y mejora de los inventarios de emisiones marítimas, incrementando la calidad y confiabilidad de las estimaciones [57].

#### 1.4.9. Metodología enfocadas en Transporte Aéreo

Las emisiones del transporte aéreo están reguladas internacionalmente por el Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA), establecido por la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) [43,45]. CORSIA constituye el primer enfoque internacionalmente adoptado para la contabiliza-

ción de emisiones de GEI del ciclo de vida de los combustibles de aviación, y requiere que todos los operadores aéreos con emisiones anuales superiores a 10.000 toneladas de CO<sub>2</sub> reporten sus emisiones de vuelos internacionales de forma anual desde el 1 de enero de 2019 [43,44].

La estimación de emisiones por vuelo se basa fundamentalmente en el consumo de combustible y el factor de emisión correspondiente:

$$E_{CO_2} = FC \times EF_{CO_2} \quad (1.6)$$

Donde  $FC$  es el consumo de combustible en kilogramos y  $EF_{CO_2}$  es el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del combustible, que para combustibles de aviación convencionales (Jet A, Jet A-1) equivale a aproximadamente 3.15 kg CO<sub>2</sub>/kg combustible [43]. Los operadores pueden monitorear el consumo de combustible mediante cinco métodos aprobados basados en; mediciones de carga de combustible y/o mediciones de combustible en los bloques de tiempo de vuelo [43,44]. Para operadores más pequeños, la ICAO ha desarrollado la herramienta *CORSIA CO<sub>2</sub> Estimation and Reporting Tool* (CERT), que aplica Modelos de Estimación de CO<sub>2</sub> (CEM) para estimar emisiones basándose en la distancia del gran círculo o el tiempo de bloque [43,44]. Las emisiones de aviación se categorizan principalmente según el ciclo de aterrizaje y despegue (LTO, *Landing and Take-Off*), que compree las fases por debajo de 3.000 pies (914 m) de altitud, las cuales corresponden a aproximación, rodaje de entrada, rodaje de salida y despegue, y la fase de cruceo por encima de esa altitud. Las emisiones del ciclo LTO tienen mayor impacto en la calidad del aire local en las inmediaciones de los aeropuertos, mientras que las emisiones de la fase de crucero contribuyen principalmente al efecto invernadero y cambio climático global [45,64].

Adicionalmente, CORSIA evalúa las emisiones del ciclo de vida de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) mediante la ecuación:

$$LCEF = \text{core LCA value} + ILUC - \text{emission credits} \quad (1.7)$$

Donde  $LCEF$  es el valor de emisiones del ciclo de vida en gCO<sub>2</sub>eq/MJ, *core LCA value* es el valor central de la evaluación del ciclo de vida,  $ILUC$  representa las emisiones por cambio indirecto del uso del suelo, y *emission credits* son los créditos por emisiones evitadas [94]. Esta metodología permite evaluar el potencial de reducción de emisiones de las diferentes vías de producción de SAF en comparación con el combustible de aviación derivado del petróleo, cuya línea base se establece en 89 gCO<sub>2</sub>eq/MJ [94].



## 1.5. Desagregación Espacial de Emisiones

La desagregación espacial de emisiones es el proceso mediante el cual las emisiones totales de una región se distribuyen geográficamente sobre una grilla de alta resolución, generalmente empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y variables *proxy* que correlacionan con la distribución espacial real de las fuentes emisoras [38, 90, 96]. Este proceso es fundamental para la aplicación de inventarios de emisiones en modelos de calidad del aire, evaluaciones de impacto en salud pública y diseño de políticas de mitigación geográficamente diferenciadas.

### 1.5.1. Variables Proxy y Datos de Sustitución

Las variables *proxy* son indicadores de sustitución que se utilizan para distribuir espacialmente las emisiones cuando no se dispone de información exacta sobre la ubicación de las fuentes emisoras [13, 34]. La selección adecuada de variables *proxy* es determinante y primordial para la precisión del inventario espacial, y su impacto es significativo a resoluciones espaciales finas [98, 115]. En cuanto al transporte terrestre, se tiene que las variables *proxy* más comúnmente empleadas incluyen la densidad y longitud de la red vial por categoría funcional, los conteos de tráfico vehicular, las velocidades promedio de circulación, los datos de GPS y trayectorias vehiculares (*floating car data*), la densidad poblacional, la densidad de empleo y actividad económica, el uso de suelo y la luminosidad nocturna detectada por satélite [13, 34, 38, 90], entre otras variables proxies que se pueden utilizar. Para el transporte marítimo, los datos AIS de embarcaciones proporcionan directamente la información espacial necesaria [66, 114], mientras que para el transporte aéreo se emplean la ubicación de aeropuertos, frecuencia de vuelos y trayectorias de vuelo [13].

En el contexto nacional, diversos estudios han abordado la cuantificación de gases de efecto invernadero provenientes del sector transporte, buscando establecer líneas base sólidas para la mitigación del cambio climático. Destaca en esta área el trabajo desarrollado por Matías Concha Palacios [11], quien propuso un modelo detallado para calcular y mapear las emisiones generadas por los modos aéreo y marítimo en Chile, utilizando como año base el 2015.

Para abordar la complejidad de la aviación, el autor implementó metodologías de estimación internacionalmente validadas, conjugando el modelo europeo propuesto por la EMEP/EEA con el enfoque norteamericano de la ACRP. Este cruce metodológico

permitió diferenciar los contaminantes emitidos durante las fases de crucero (CCD) y las maniobras de aterrizaje y despegue (LTO), logrando contabilizar más de 1,660 kt de CO<sub>2</sub> para operaciones domésticas y superando los 2,500 kt de CO<sub>2</sub> en vuelos internacionales. Los resultados consolidados de estas estimaciones ofrecen una radiografía precisa del impacto ambiental del rubro. En la Figura 1.10 se detalla la magnitud de las emisiones de dióxido de carbono atribuidas a los distintos ciclos y clasificaciones operacionales del sector aéreo, evidenciando el peso de las rutas internacionales.

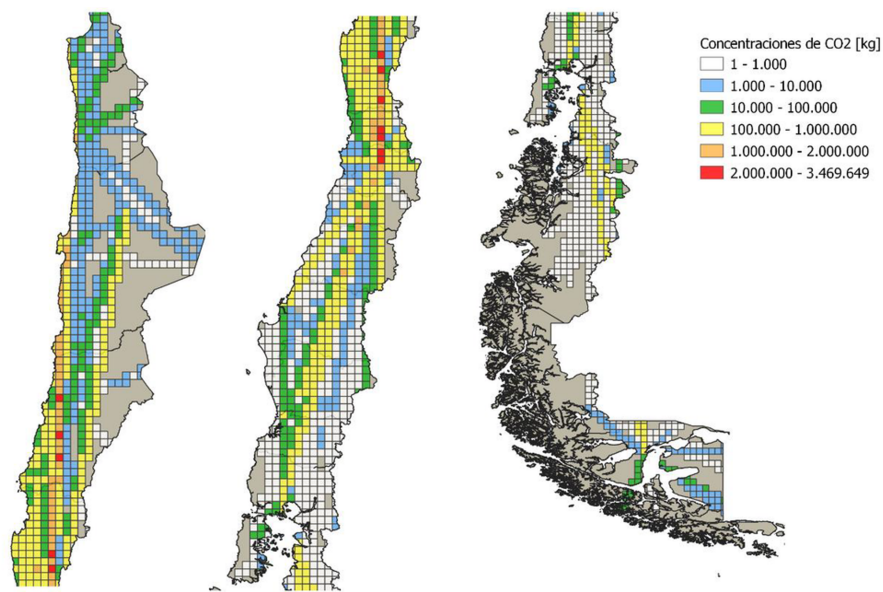


Figura 1.10: Estimación consolidada de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el sector aéreo en Chile, diferenciadas por ciclo de vuelo y tipo de ruta [11].

Sin embargo, más allá de los volúmenes totales emitidos, comprender el verdadero impacto atmosférico requiere analizar el comportamiento geográfico de los contaminantes. Atendiendo a esta necesidad, el modelo no solo cuantifica, sino que proyecta espacialmente estas cifras. La Figura 1.11 ilustra la dispersión y concentración del CO<sub>2</sub> a lo largo de las rutas de tránsito y terminales, proporcionando una perspectiva cartográfica que resulta fundamental para evaluar la huella de carbono a nivel regional y orientar la toma de decisiones en políticas de control de calidad del aire.

Un aspecto crítico identificado en la literatura y que es importante mencionar es que la densidad poblacional, aunque frecuentemente utilizada como *proxy* por su amplia disponibilidad, no siempre representa adecuadamente la distribución de emisiones del transporte. Karvosenoja et al. (2018), en un estudio de alta resolución para Finlandia, encontraron que el uso de densidad poblacional como *proxy* para el sector de maquinaria

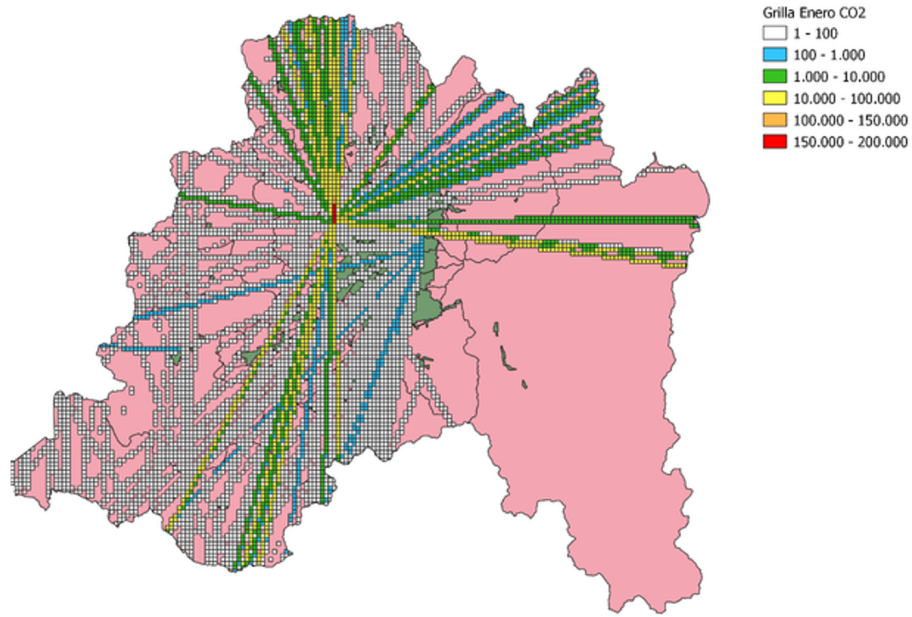


Figura 1.11: Distribución espacial de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la actividad del transporte a lo largo del territorio nacional [11].

resultó en una disminución del 41 % en las emisiones estimadas para el área de Helsinki comparado con el uso de *proxies* más específicos [70]. De manera similar, la base de datos EDGAR v8.0 ha desarrollado más de 130 conjuntos de datos *proxy* específicos por sector y variables en el tiempo para mejorar la precisión de la distribución espacial de emisiones [13].

## 1.5.2. Metodologías de Desagregación Espacial

### Desagregación Basada en Densidad Vial

La aproximación más básica para la desagregación espacial de emisiones del transporte terrestre distribuye las emisiones proporcionalmente a la longitud de la red vial presente en cada celda de la grilla [90,96]:

$$E_j = \left( \frac{l_{ij}}{\sum_i l_{ij}} \right) \times E_{\text{total}} \quad (1.8)$$

Donde  $E_j$  es la emisión asignada a la celda  $j$ ,  $l_{ij}$  es la longitud de vía tipo  $i$  en la celda  $j$ , y  $E_{\text{total}}$  es la emisión total a distribuir. Si bien esta metodología es sencilla de

Tabla 1.3: Resumen de variables *proxy* utilizadas para cada modo de transporte con sus ventajas y limitaciones. Fuente: Adaptado de Crippa et al. (2024).

| Modo de Transporte | Variables <i>Proxy</i> Comunes                                                      | Observaciones / Limitaciones                                                                      |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Terrestre</b>   | Densidad vial, conteos de tráfico, <i>floating car data</i> , densidad poblacional. | Alta precisión con datos dinámicos (GPS), pero posibles sesgos al usar solo densidad poblacional. |
| <b>Marítimo</b>    | Datos del Sistema de Identificación Automática (AIS).                               | Información directa y de alta resolución espacial e instantánea.                                  |
| <b>Aéreo</b>       | Ubicación de aeropuertos, trayectorias, frecuencia de vuelos.                       | Concentración de emisiones en ciclo LTO vs. fase de crucero.                                      |

implementar y requiere únicamente información de la red vial digital, puede generar errores significativos al no considerar las diferencias en flujos vehiculares entre vías, las velocidades de circulación variables y la heterogeneidad en la composición de la flota [90, 96]. No obstante, cuando se complementa con una clasificación funcional de las vías (autopistas, carreteras principales, vías secundarias, caminos locales), la precisión mejora considerablemente [96].

### Desagregación Basada en Modelos de Transporte

En este tema, la metodología más precisa para la desagregación espacial utiliza resultados de modelos de transporte que proporcionan información detallada sobre flujos vehiculares, velocidades y composición de flota a nivel de arco vial [78, 90]. En Chile, la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA) ha desarrollado modelos de transporte para las principales ciudades del país utilizando el software ESTRASUS, que proporciona flujos vehiculares y tiempos de viaje por arco para la red vial principal [78, 90]. Hablando y en referencia al contexto latinoamericano, el desarrollo de inventarios de emisiones con alta resolución espacial ha cobrado especial relevancia para la gestión de la calidad del aire en grandes metrópolis. Diversos estudios han comenzado a transitar desde estimaciones agregadas a nivel nacional o regional, hacia modelamientos distribuidos que permiten identificar los "puntos calientes." focos

críticos de contaminación urbana.

Un referente destacado de esta evolución metodológica es el análisis de emisiones vehiculares en Colombia [89]. La Figura 1.12 ilustra la aplicación de mallas de alta resolución para cartografiar las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) en cuatro de los principales núcleos urbanos del país.

Como se puede observar en los mapas de calor, la técnica de desagregación permite revelar cómo la intensidad de las emisiones (expresada en Gigagramos por año) no es homogénea, sino que se concentra fuertemente en los valles centrales, corredores industriales y las arterias viales de mayor flujo. Este tipo de aproximación es precisamente la base conceptual que sustenta la necesidad de aplicar grillas de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  para el territorio chileno, tal como se propone en los objetivos de la presente investigación.

Las emisiones por arco vial se calculan mediante:

$$E_{i,k} = V_i \times L_i \times EF_k(v_i) \times t \quad (1.9)$$

Donde  $V_i$  es el flujo vehicular en el arco  $i$  (veh/h),  $L_i$  es la longitud del arco (km),  $EF_k(v_i)$  es el factor de emisión del contaminante  $k$  en función de la velocidad (g/km), y  $t$  es el período de tiempo considerado (h) [90]. Por su parte, en el estudio e investigación llevado a cabo por Saide et al. (2009), ellos aplicaron y compararon diversas metodologías de desagregación espacial para las emisiones del tráfico vehicular en Santiago de Chile, obteniendo resultados con distintos niveles de precisión como se observa en la Figura 1.13. Los autores encontraron que las metodologías que combinan clasificación de conteos de tráfico o mapas de uso de suelo con la red vial simplificada producen las mejores correlaciones ( $R^2 \approx 0,9$ ) con el inventario de referencia y capturan adecuadamente los picos de emisión (error relativo  $< 30\%$ ) [90].

### **Datos GPS y *Floating Car Data***

El uso creciente de datos GPS de flotas vehiculares (taxis, buses, vehículos comerciales) y tecnologías de *floating car data* (FCD) permite desagregaciones espaciales de muy alta resolución basadas en trayectorias reales de circulación [38, 73]. Esta aproximación captura patrones reales de movilidad, proporciona información de velocidades instantáneas, permite análisis dinámico temporal e identifica puntos de congestión y *hotspots* de emisión. Sin embargo, presenta desafíos relacionados con la representatividad de la muestra (predominio de ciertos tipos de vehículos), la privacidad de datos, los requerimientos computacionales elevados y la necesidad de corrección por composición

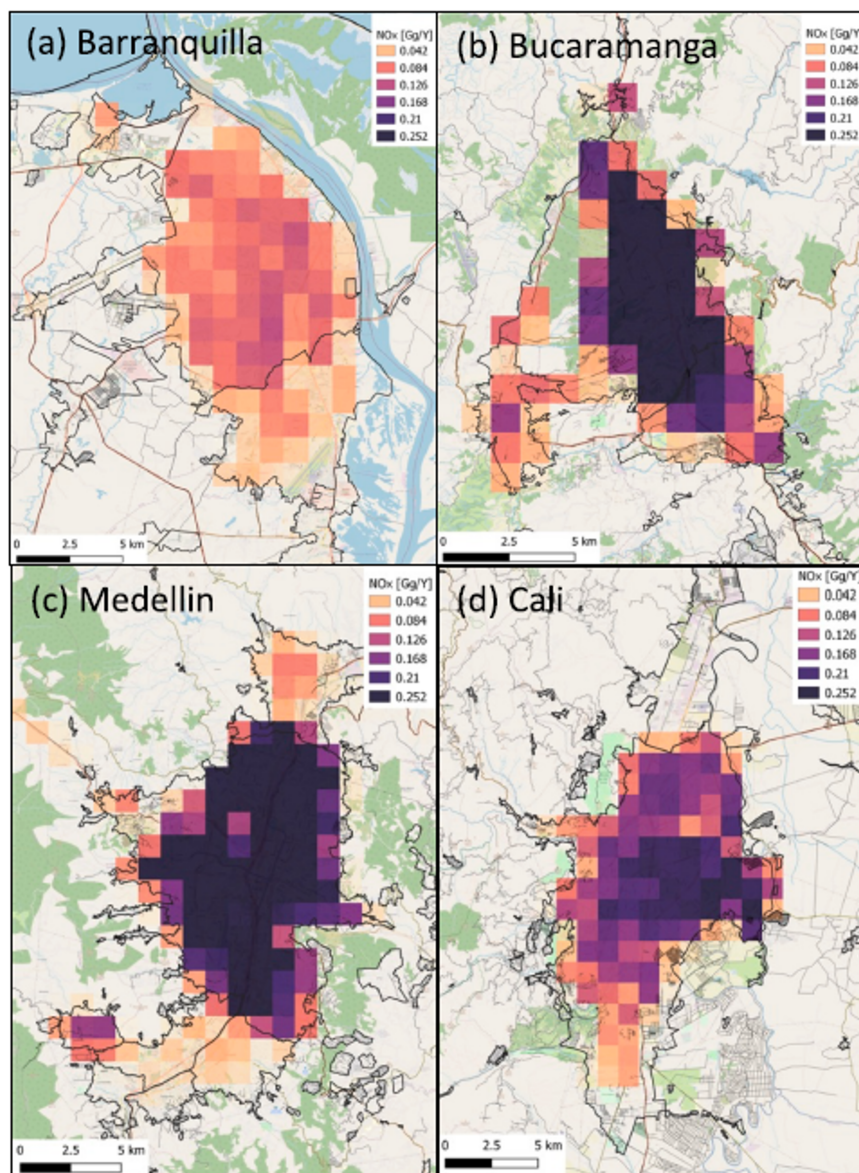


Figura 1.12: Distribución espacial de las emisiones de NO<sub>x</sub> (Gg/año) mediante celdas de alta resolución en las ciudades colombianas de (a) Barranquilla, (b) Bucaramanga, (c) Medellín y (d) Cali. Los tonos más oscuros indican los focos de mayor intensidad de emisión.



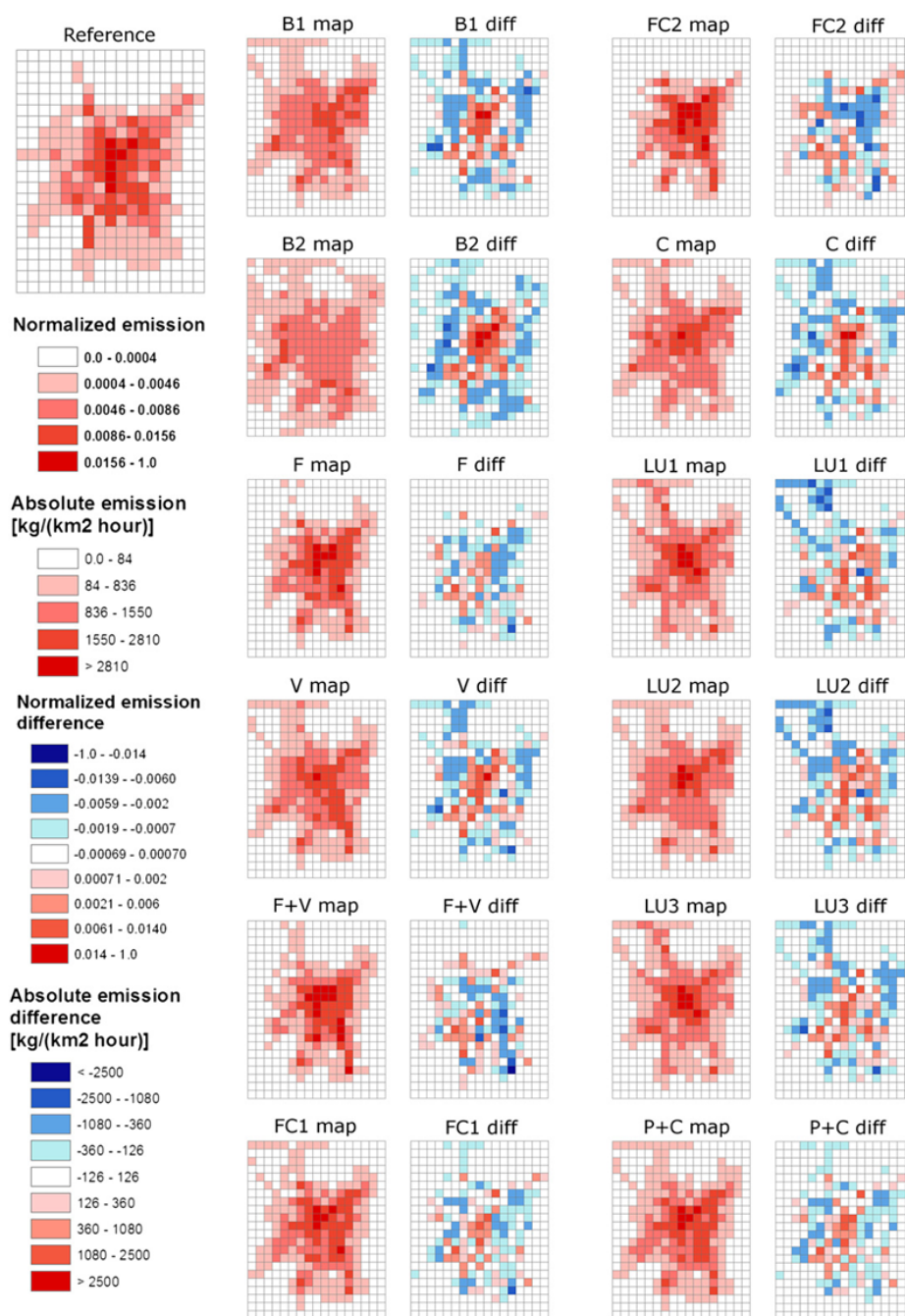


Figura 1.13: Mapas comparativos de emisiones normalizadas y absolutas y diferencias usando diferentes metodologías y enfoques de desagregación espacial. Fuente: [90]

de flota [38].

## **Métodos Basados en Teledetección e Inteligencia Artificial**

La teledetección satelital y la inteligencia artificial ofrecen alternativas innovadoras para la desagregación espacial, especialmente en regiones con datos limitados de monitoreo terrestre [34, 35]. La luminosidad nocturna (*nighttime lights*) detectada por satélite ha sido utilizada como *proxy* para la actividad económica y las emisiones de CO<sub>2</sub>, con resolución espacial de aproximadamente 1 km [34]. Estudios recientes han desarrollado sistemas de inventario de emisiones dinámicos basados en detección de objetos mediante aprendizaje profundo (redes neuronales YOLO v8-v10) aplicados a imágenes satelitales de alta resolución, permitiendo la detección y clasificación automática de vehículos y la estimación de flujos vehiculares con resolución espacial sub-métrica [35].

### **1.5.3. Resolución Espacial e Incertidumbre**

La resolución espacial del inventario grillado afecta significativamente la incertidumbre de las estimaciones de emisiones. El estudio de Zhao et al. (2017) en la provincia de Hebei, China, comparó inventarios basados en *proxies* con inventarios *bottom-up* detallados a diferentes resoluciones espaciales y encontró que a resoluciones superiores a 0,25° ( $\approx 25$  km), los inventarios basados en *proxies* son comparables a los *bottom-up*; sin embargo, a resoluciones menores aparecen sesgos significativos [115]. En particular, los sesgos son positivos en centros urbanos y negativos en áreas suburbanas y rurales. El impacto en modelación de calidad del aire es considerable, ya que a 36 km de resolución, el sesgo en concentraciones predichas es de 3-13 %, mientras que a 4 km el sesgo adicional alcanza 8-73 % [98, 115].

### **1.5.4. Experiencia en Chile**

Chile cuenta principalmente con dos contribuciones fundamentales al desarrollo de inventarios de emisiones de alta resolución espacial, por un lado se cuenta con el Inventario Nacional de Emisiones Antropogénicas (INEMA) y también con el inventario de emisiones del transporte por carretera de Osses et al.

INEMA, desarrollado por Álamos et al. (2022), constituye el primer inventario nacional de alta resolución de emisiones antropogénicas para Chile [116, 117]. El



inventario estima emisiones para los sectores vehicular, industrial, energía, minería y residencial para el período 2015-2020, distribuidas espacialmente sobre una grilla de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  (aproximadamente  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ). Los contaminantes incluidos son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{COV}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2,5}$  para todos los sectores, con  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y carbono negro adicionales para transporte y fuentes residenciales [116, 117]. La distribución espacial se realiza utilizando datos censales y la información de la red vial de Chile. Los resultados revelan patrones regionales diferenciados, ya que mientras en el norte de Chile dominan las emisiones de minería y centrales termoeléctricas, en Chile central las fuentes principales son el transporte y el sector residencial, y por otro lado se tiene que en el sur el sector residencial domina debido al clima más frío [116, 117].

En cuanto al inventario de Osses et al. (2022), este es crucial para Chile y proporciona mapas de distribución espacial de alta resolución ( $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ ) de las emisiones del transporte por carretera en Chile para el período 1990-2020, incluyendo  $\text{CO}$ ,  $\text{COV}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y carbono negro [86, 87]. Un ejemplo de estos mapas, se presenta en la Figura 1.14. La metodología considera 70 tipos vehiculares y utiliza factores de emisión de COPERT 5 adaptados a condiciones locales. Un hallazgo notable es el desacoplamiento entre el crecimiento de la flota vehicular (5 veces entre 1990 y 2020) y las emisiones de contaminantes locales, que han disminuido gracias a tecnologías de abatimiento más estrictas, mejor calidad de combustibles y cumplimiento de estándares de emisión más exigentes [86]. La comparación con inventarios globales (EDGAR, CAMS, CEDS) muestra similitudes en las estimaciones de  $\text{CO}_2$  pero diferencias significativas en PM, carbono negro y  $\text{CO}$ , sugiriendo que los inventarios globales no reflejan adecuadamente las mejoras en la flota vehicular chilena posteriores a 2005 [86].

## **1.6. Desagregación Temporal de Emisiones**

La desagregación temporal convierte las emisiones anuales en perfiles de emisión de resolución temporal más fina, como distribución mensual, semanal, diaria u horaria, permitiendo capturar la variabilidad temporal de las actividades emisoras y mejorar la precisión de los modelos de calidad del aire y modelos climáticos [12, 39]. La importancia de una caracterización temporal precisa ha sido reafirmada recientemente por estudios que demuestran su impacto significativo en la calidad de las predicciones de modelos atmosféricos [40].

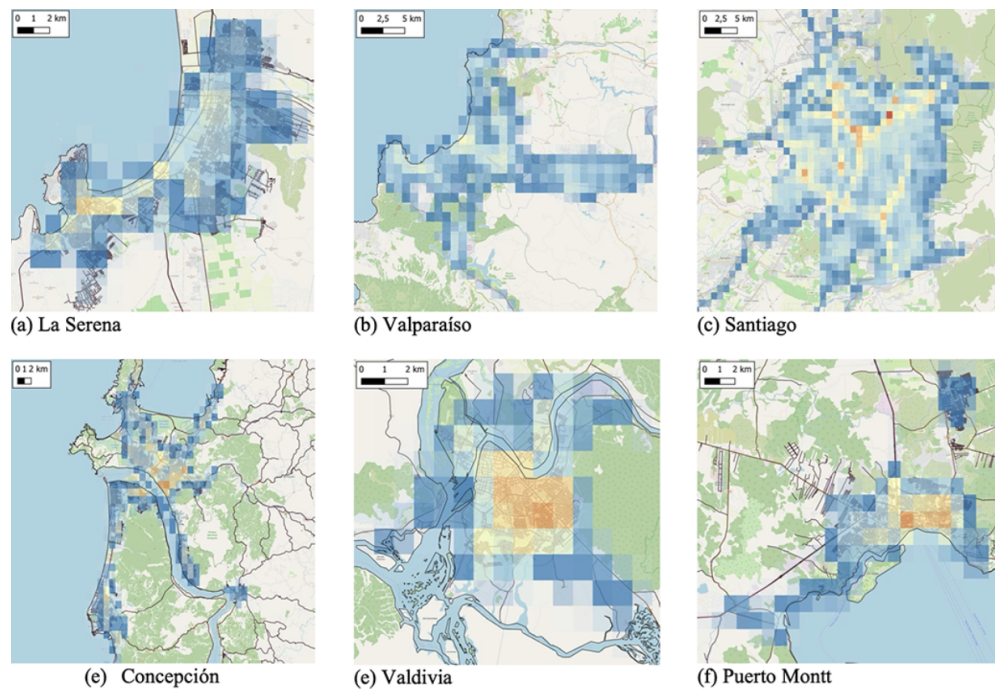


Figura 1.14: Mapas de distribución espacial de emisiones de NO<sub>x</sub> del transporte por carretera en Chile, mostrando las principales ciudades y corredores viales. Fuente: [86]

### 1.6.1. Escalas Temporales de Variabilidad

Las emisiones del sector transporte exhiben variabilidad en múltiples escalas temporales, cada una gobernada por diferentes factores subyacentes. A escala interanual, la variabilidad responde al crecimiento económico, cambios en la población vehicular, penetración de tecnologías limpias, políticas de transporte y eventos extraordinarios como pandemias o crisis económicas. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 1.15 en donde se muestran las variaciones anuales totales de escape por tipo de vehículo desde el año 1990 hasta el 2020. La variabilidad estacional (mensual) refleja patrones vacacionales, variaciones climáticas (temperatura, precipitación), actividad agrícola y turística, y demanda de climatización vehicular. A escala semanal, las diferencias entre días laborables y fines de semana generan fluctuaciones significativas en los flujos vehiculares y, por ende, en las emisiones. Finalmente, la variabilidad diaria (horaria) captura las horas punta matutina y vespertina, los patrones diurnos/nocturnos y los horarios de operación del transporte de carga y la aviación comercial [7, 12, 39].



Figura 1.15: Tendencias de las emisiones anuales totales de escape según tipo de vehículo en Chile, 1990-2020. Fuente: Osses et al. (2022) Earth System Science Data, 14, 1359-1376.

## 1.6.2. Metodología de Perfiles Temporales

Los perfiles temporales son factores de peso que se aplican a las emisiones anuales para obtener emisiones en períodos temporales más cortos [12, 39]. Un perfil temporal  $P$  se define como:

$$P_t = \frac{E_t}{\frac{\sum_t E_t}{N}} \quad (1.10)$$

Donde  $P_t$  es el peso temporal en el período  $t$ ,  $E_t$  es la emisión en el período  $t$ , y  $N$  es el número de períodos en el ciclo. Por construcción, el promedio de los pesos temporales es igual a 1.0; valores  $P_t > 1$  indican períodos con emisiones superiores al promedio, mientras que valores  $P_t < 1$  señalan emisiones inferiores [39]. La aplicación combinada de perfiles a diferentes escalas temporales permite descomponer la emisión anual en emisiones horarias:

$$E_t = E_{\text{anual}} \times \frac{P_{\text{mes}} \times P_{\text{día-semana}} \times P_{\text{hora}}}{N_{\text{períodos}}} \quad (1.11)$$

### 1.6.3. CAMS-TEMPO: Perfiles Temporales Globales y Regionales

El programa Copernicus Atmosphere Monitoring Service ha desarrollado CAMS-TEMPO (TEMPOral profiles), el cual corresponde a un conjunto de datos de perfiles temporales de emisiones que proporciona factores de peso mensuales, diarios, semanales y horarios para modelación química atmosférica [12, 39]. CAMS-TEMPO incluye perfiles para los contaminantes prioritarios del aire (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, COV<sub>nm</sub>, NH<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) y los gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) para las categorías de fuentes antropogénicas incluyendo el transporte vial y el tráfico aéreo en aeropuertos [39].

Los perfiles se calculan sobre una grilla global de 0.1° × 0.1° y regional europea de 0.1° × 0.05°, siguiendo las descripciones de dominio y clasificación sectorial de los inventarios de emisiones desarrollados bajo el programa CAMS [12, 39]. Los perfiles consideran la variabilidad de los principales impulsores de emisión de cada sector, combinando información relevante y sustancial incluyendo estadística vinculada a la variabilidad de emisiones (como producción eléctrica y conteos de tráfico) a nivel nacional y local con parametrizaciones dependientes de la meteorología para incorporar las influencias de factores sociodemográficos y condiciones climatológicas [12, 39]. Por lo tanto, es claro que la desagregación desarrollado por Guevara et al. (2021) para el inventario CAMS-TEMPO, es posible evidenciar la marcada variabilidad del sector transporte terrestre.

A nivel estacional, el transporte terrestre presenta variaciones a lo largo del año que están influenciadas por periodos vacacionales, variaciones climáticas que afectan el desempeño de los motores, y niveles de actividad comercial. Las figuras 1.16 y 1.17 ilustra estos perfiles mensuales, demostrando cómo las emisiones fluctúan respecto al promedio anual dependiendo de la región de estudio y ámbito.

En cuanto y específicamente hablando del transporte vial, los perfiles temporales de CAMS-TEMPO se desarrollan considerando distintas resoluciones temporales como se presenta en la Tabla 1.4: perfiles mensuales basados en estadísticas de ventas de combustible y correcciones por temperatura; perfiles semanales derivados de conteos de tráfico por día de la semana con diferenciación por tipo de vía; y perfiles horarios contruidos a partir de conteos de tráfico de estaciones permanentes, diferenciando patrones de movilidad por tipo de día y zona geográfica [39]. Dependiendo del sector

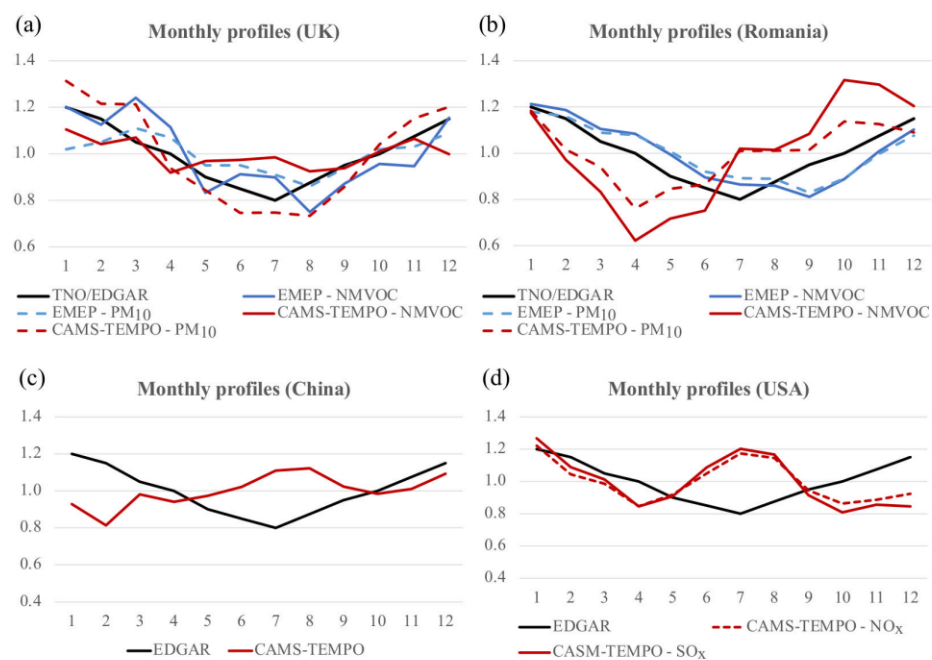


Figura 1.16: Factores de peso temporal mensual para la desagregación de emisiones del transporte vial. Se observa la variabilidad intermensual que captura los efectos estacionales y periodos vacacionales en distintos países. Fuente: Guevara et al. (2021) [39].

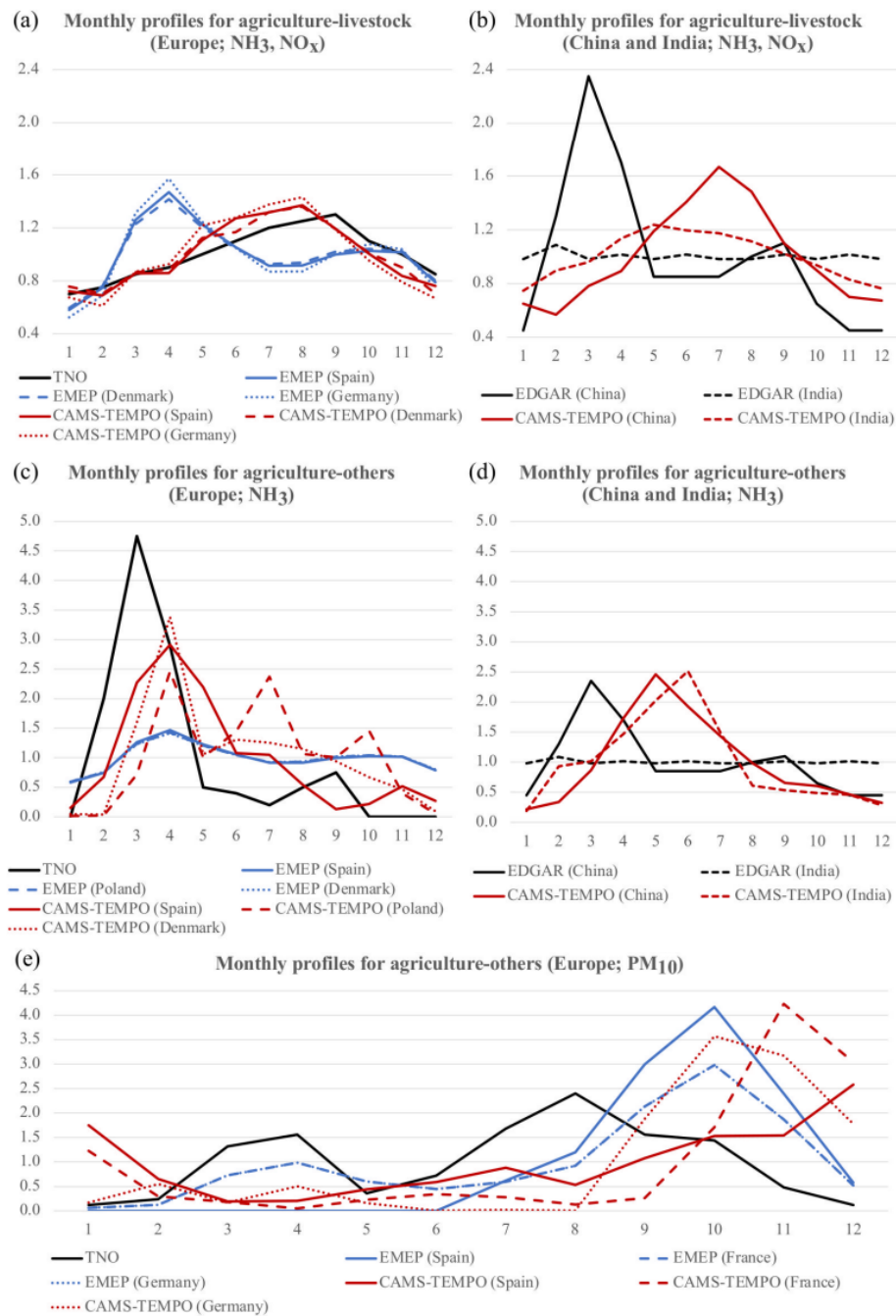


Figura 1.17: Comparación de los perfiles mensuales de emisiones agrícolas con los perfiles de EDGAR, EMEP y TNO para los países y categorías seleccionados. Fuente: Guevara et al. (2021) [39].

y la resolución temporal, los perfiles resultantes son dependientes del contaminante, dependientes del año (series temporales 2010-2017) y/o espacialmente dependientes (los pesos temporales varían por país o región) [39].

Tabla 1.4: Características y base metodológica de los perfiles temporales CAMS-TEMPO para el transporte vial [39].

| <b>Resolución Temporal</b>    | <b>Base de Datos / Metodología</b>                                        | <b>Variables de Diferenciación / Dependencias</b>                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mensual</b>                | Estadísticas de ventas de combustible y correcciones por temperatura.     | -                                                                                       |
| <b>Semanal</b>                | Conteos de tráfico por día de la semana.                                  | Tipo de vía.                                                                            |
| <b>Horaria</b>                | Conteos de tráfico provenientes de estaciones permanentes.                | Patrones de movilidad por tipo de día y zona geográfica.                                |
| <b>Dependencias Generales</b> | Variables aplicables según el sector y la resolución temporal resultante. | Contaminante, año (series temporales 2010-2017) y dependencia espacial (país o región). |

Un hallazgo relevante de CAMS-TEMPO que no se puede omitir, es la existencia de variabilidad espacial significativa en los perfiles temporales entre países y regiones, reflejando diferencias en estructura socioeconómica, patrones culturales y laborales, condiciones climáticas e infraestructura de transporte. Por ejemplo, el perfil horario de tráfico en países mediterráneos muestra un patrón trimodal (pico matutino, pausa de mediodía, pico vespertino), mientras que en países del norte de Europa predomina un patrón bimodal (picos matutino y vespertino) [39], esto se puede observar en la Figura 1.18. Esta variabilidad regional tiene implicaciones directas para la transferibilidad de perfiles temporales a contextos como el chileno, en donde entre otras cosas, se requiere una adaptación cuidadosa a las condiciones locales. La evaluación de los perfiles CAMS-REG-TEMPO en el sistema de modelación de calidad del aire de CAMS (2025) ha demostrado mejoras significativas en la representación de ciclos observados. Para  $\text{NO}_2$ , las correlaciones de ciclos semanales aumentan hasta +0.17 debido a una mejor representación de las emisiones del transporte vial. Las correlaciones de  $\text{PM}_{10}$

mejoran en invierno (hasta +0.13 semanal y +0.07 diurno) gracias a la refinación de las emisiones de combustión residencial de leña [40].

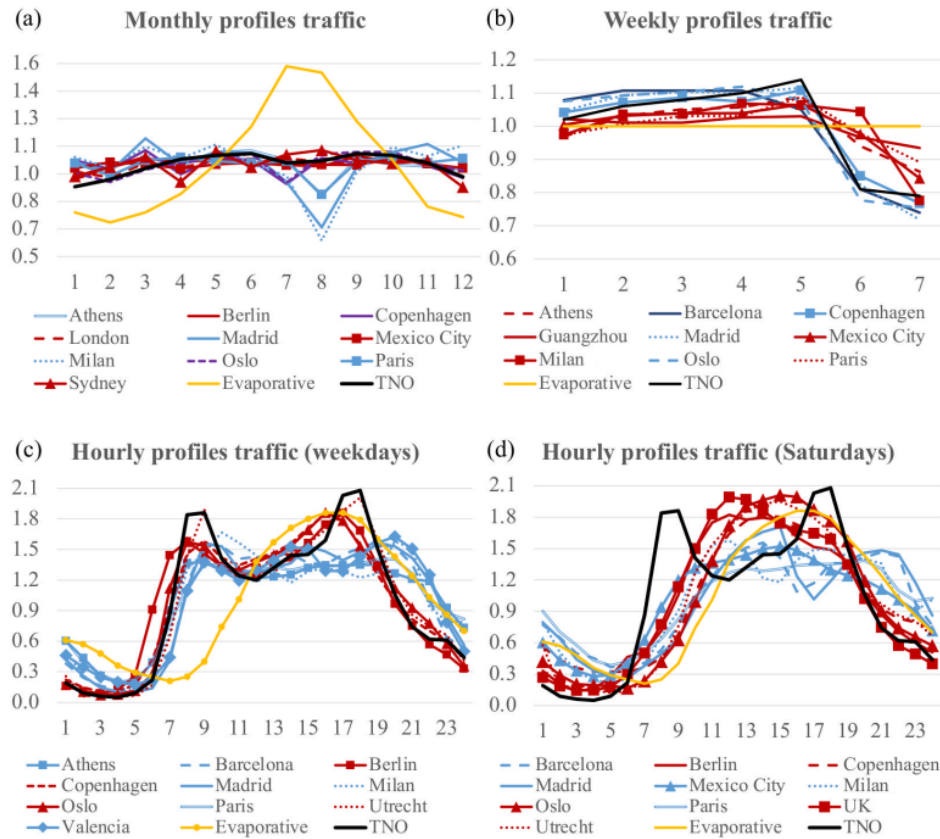


Figura 1.18: Gráficos de perfiles temporales de emisiones del transporte vial para diferentes países/regiones, mostrando variaciones mensuales, semanales y horarias. Fuente: Guevara et al. (2021) Earth System Science Data, 13, 367-404.

#### 1.6.4. Perfiles Temporales de EDGAR

La base de datos EDGAR ha desarrollado perfiles temporales de alta resolución para contaminantes del aire y GEI co-emitidos por fuentes antropogénicas [12, 14]. Las innovaciones de EDGAR incluyen perfiles anuales específicos por país/región y sector para todas las fuentes, perfiles anuales dependientes del tiempo para fuentes con variabilidad interanual de su patrón estacional, también se incluyen perfiles semanales y diarios específicos por país, y un sistema flexible que permite computar emisiones horarias integrando datos de diferentes usuarios [12]. Los perfiles son dependientes del



contaminante, reflejando que diferentes contaminantes pueden exhibir perfiles temporales ligeramente distintos debido a variaciones en la composición de flota, diferencias en factores de emisión por condiciones de operación, impacto de la temperatura en emisiones evaporativas de COV y efectos del arranque en frío [12, 14].

### **1.6.5. Variabilidad Temporal del Tráfico y Factores de Asignación**

Batterman et al. (2015) desarrollaron métodos para mejorar la caracterización de la variación temporal del tráfico mediante el desarrollo de factores de asignación temporal precisos, analizando datos de conteos continuos de tráfico en carreteras de Michigan, Estados Unidos [7]. Los hallazgos principales incluyen variaciones estacionales de hasta  $\pm 15\%$  respecto al promedio anual, tráfico en días laborables 10-20 % superior a fines de semana, un patrón bimodal pronunciado en días laborables (picos entre 7-9 AM y 4-6 PM) y diferencias significativas entre vehículos ligeros (patrón bimodal) y vehículos pesados (distribución más uniforme durante horas diurnas) [7]. El uso de factores de asignación temporal precisos resulta crítico para evaluar la exposición poblacional a contaminantes en horas específicas y para diseñar políticas de gestión de tráfico efectivas.

## **1.7. Proyecciones de Emisiones al 2050**

En cuanto a la proyección de emisiones del sector transporte al horizonte 2050, esto constituye un componente imprescindible para evaluar trayectorias de emisiones, diseñar políticas de mitigación y determinar la consistencia de los compromisos nacionales (NDC) con los objetivos del Acuerdo de París [63, 64].

### **1.7.1. Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSP)**

Los *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) son escenarios de referencia utilizados en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6) que describen posibles evoluciones futuras de la sociedad, combinando proyecciones demográficas, económicas, tecnológicas, de uso de suelo y de gobernanza [88, 107]. Los cinco SSP se definen de la siguiente manera; en primer lugar se comienza con SSP1 (Sostenibilidad), con enfoque en desarrollo sostenible, baja desigualdad y transición rápida a energías limpias; luego SSP2 (Camino Intermedio), con continuación de tendencias históricas; SSP3 (Rivalidad

Regional), con fragmentación y alta desigualdad; SSP4 (Desigualdad), con polarización tecnológica; y SSP5 (Desarrollo Intensivo en Fósiles), con alto crecimiento económico basado en energías convencionales [88].

Los SSP se combinan con niveles de forzamiento radiativo para generar escenarios integrados SSP-RCP. Los escenarios SSP1-1.9 y SSP1-2.6 limitan el calentamiento a menos de 2°C (consistentes con París), los escenarios SSP2-4.5 representa un escenario intermedio (calentamiento  $\approx 2,7^{\circ}\text{C}$  para 2100), y en cuanto a los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 corresponden a, escenarios pesimistas (calentamiento de 3.6°C y 4.4°C respectivamente) [88, 107]. Ejemplo de estos escenarios y proyecciones se muestran en las Figuras 1.19 y 1.20. Para el sector transporte, los modelos integrados como IMAGE 3.2 incorporan representaciones detalladas de costos tecnológicos de transporte eléctrico y de hidrógeno, preferencias modales y patrones de saturación de demanda de transporte específicos para cada SSP [107]. Kramel et al. (2024) proyectan que el transporte marítimo podría requerir entre 14 y 20 EJ para 2050, correspondiendo a un incremento de 3 % (SSP1-1.9) a 44 % (SSP3-7.0) respecto a 2018 [71].

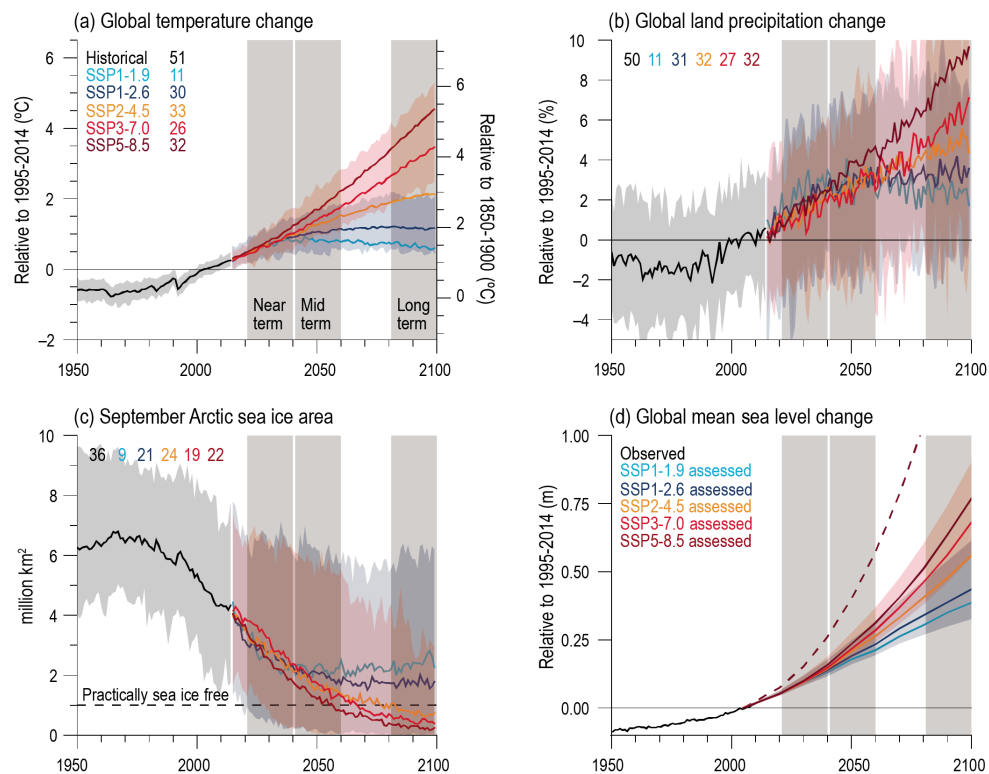


Figura 1.19: Proyecciones de temperatura global y otros parámetros bajo los diferentes escenarios SSP hasta 2100. Fuente: IPCC AR6 Working Group I, Chapter 4.

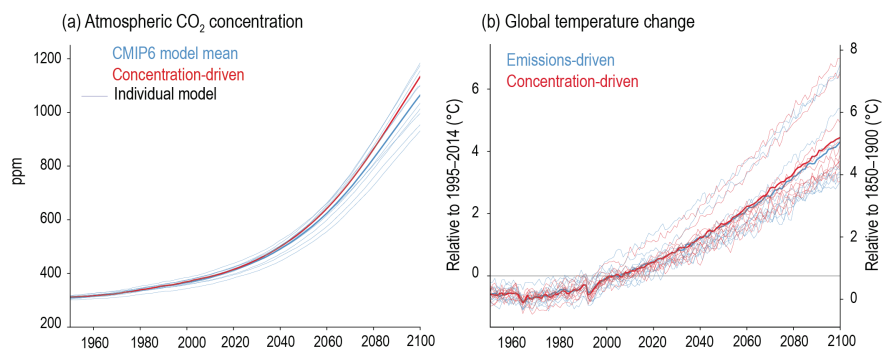


Figura 1.20: Proyecciones de emisiones globales de CO<sub>2</sub> del transporte hasta 2100. Fuente: IPCC AR6 Working Group I, Chapter 4.

### 1.7.2. Proyecciones Globales del Sector Transporte

El Capítulo 10 del AR6 del IPCC (Grupo de Trabajo III) establece que, sin intervención de políticas adicionales, las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte podrían crecer entre un 16 % y un 50 % para 2050 (confianza media), impulsadas por el crecimiento continuo de la demanda de servicios de pasajeros y carga, particularmente en países en desarrollo de África y Asia [64]. Sin embargo, algo importante que hay que mencionar es que los escenarios que limitan el calentamiento a 1.5°C sin o con rebasamiento limitado sugieren que se requiere una reducción del 59 % (rango intercuartílico 42-68 %) en las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte para 2050 respecto a los niveles modelados de 2020 [64].

La evidencia disponible indica que las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte necesitan restringirse a aproximadamente 2 a 3 Gt en 2050 (reducción del 70-80 % respecto a niveles de 2015) para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París. Un enfoque intermodal balanceado que combine medidas de Evitar, Cambiar y Mejorar (*Avoid-Shift-Improve*, ASI) puede generar una reducción estimada de 2.39 GtCO<sub>2</sub>eq para 2030 y 5.74 GtCO<sub>2</sub>eq para 2050 [64]. La descarbonización transformativa del sistema global de transporte requiere, además de cambios tecnológicos, un cambio de paradigma que priorice soluciones de alta accesibilidad que minimicen la cantidad de movilidad motorizada necesaria [64].

### 1.7.3. Proyecciones para Chile

#### Compromisos Nacionales y Metas del Sector Transporte

Chile ha establecido objetivos ambiciosos en su NDC actualizada y su Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) [2,52,76]. Las metas generales incluyen una reducción del 30 % del balance de GEI para 2030, emisiones absolutas anuales de 95 MtCO<sub>2</sub>eq para 2030, alcanzar el pico de emisiones de GEI en 2025, y lograr la carbono neutralidad para 2050 [2, 52]. Para el sector transporte, el escenario de carbono neutralidad de la NDC contempla las siguientes metas específicas [2, 76]:

- 100 % de ventas de vehículos livianos nuevos de cero emisiones (ZEV) para 2035.
- 100 % de transporte público urbano eléctrico para 2040.
- Penetración de hidrógeno del 71 % en transporte de carga para 2050.
- 40 % de reducción en emisiones directas de GEI por uso de combustible en el sector transporte (incluyendo transporte terrestre, marítimo y aéreo) para 2050 respecto a 2018, con meta intermedia del 20 % para 2040.
- 50 % de reducción en emisiones de contaminantes locales del transporte vial para 2050.

Santiago es la capital que cuenta con la mayor flota de buses eléctricos fuera de China, con más del 38 % de los buses siendo eléctricos a principios de 2025 [2]. Según las proyecciones, las emisiones del transporte podrían aumentar entre 3 % y 9 % para 2030 respecto a 2018, dependiendo del escenario modelado. Sin embargo, y gracias a las metas y compromisos establecidos, se anticipa una reducción de largo plazo entre 18 % y 50 % para 2050 comparado con 2018 [2].

#### Evaluación del ICCT para Chile

El *International Council on Clean Transportation* (ICCT) publicó en 2025 una evaluación actualizada de la transición global hacia vehículos de cero emisiones, que incluye un análisis detallado para Chile [52]. El estudio analiza tres escenarios para las emisiones del transporte vial los cuales se detallan a continuación: 1) Por un lado el escenario *Baseline* refleja las políticas adoptadas hasta agosto de 2024, incluyendo estándares de eficiencia para vehículos livianos (vigentes desde 2024), estándares para

vehículos comerciales livianos (desde 2026) y estándares para vehículos pesados (desde 2028, según la Ley de Eficiencia Energética 21.305). 2) El escenario *Momentum* incorpora las metas no vinculantes de la Estrategia Nacional de Electromovilidad 2021, incluyendo 100 % ZEV para buses urbanos y vehículos livianos para 2035 y 100 % ZEV para vehículos pesados y buses interurbanos para 2045. Y finalmente 3) El escenario *Ambitious* está alineado con una trayectoria compatible con el Acuerdo de París (< 2°C) [52]. Estos escenarios con sus respectivas modelaciones y estimaciones se presentan en las Figuras 1.21 y 1.22.

La conclusión principal del ICCT es que si Chile cumple sus objetivos existentes y propuestos, seguiría de cerca una trayectoria compatible con el Acuerdo de París para las emisiones del transporte vial [52]. Este hallazgo posiciona a Chile como un modelo potencial para otros países de América Latina en la transición hacia el transporte limpio.

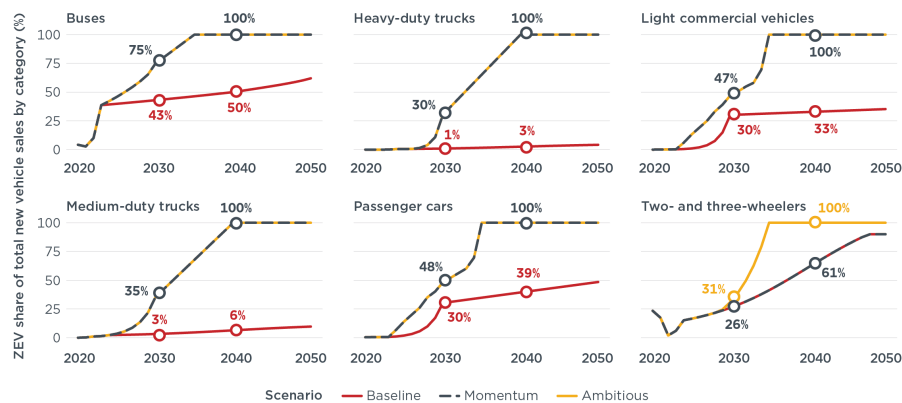


Figura 1.21: Porcentaje de ventas de vehículos nuevos con cero emisiones por categoría de vehículo bajo los escenarios *Baseline*, *Momentum* y *Ambitious*. Fuente: ICCT (2025).

Por su parte, y como se muestra en las Figuras 1.23 y 1.24, Climate Analytics ha analizado trayectorias compatibles con 1.5°C para Chile, encontrando que en el escenario de Electrificación Profunda (*Deep Electrification*), la electricidad alcanzaría el 25 % de la mezcla energética del transporte para 2030 y casi el 90 % para mediados de siglo, mientras que en el escenario de Mínima Dependencia de CDR, la electricidad llegaría a casi 10 % en 2030 y 68 % en 2050, complementada con biocombustibles al 30 % [10]. Ambas trayectorias proyectan la descarbonización del sector transporte chileno alrededor de 2050 mediante la rápida escalada de electrificación, biocombustibles e hidrógeno [10].

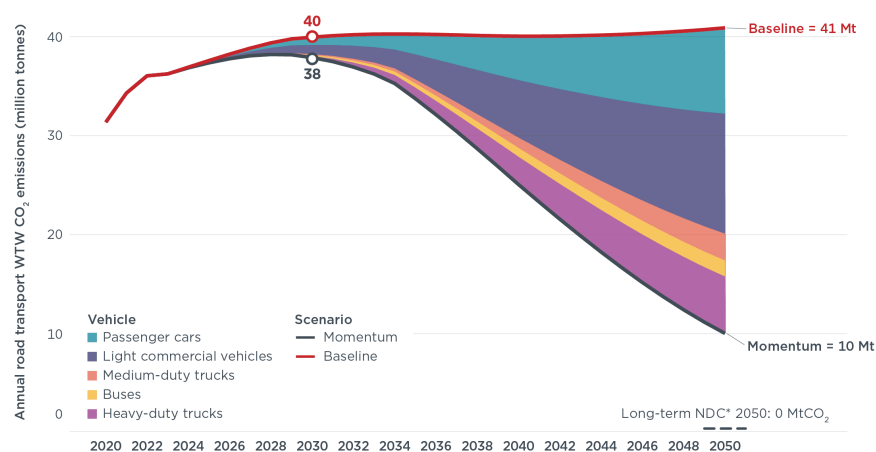


Figura 1.22: Proyecciones de emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte vial en Chile por categoría vehicular y bajo los escenarios *Baseline* y *Momentum*. Fuente: ICCT (2025).

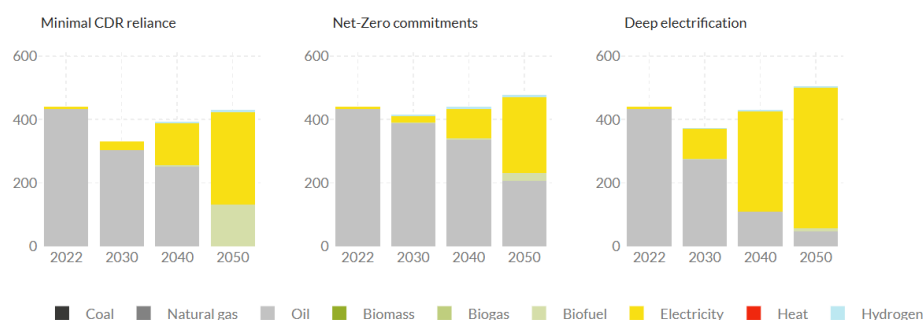


Figura 1.23: Mezcla energética del transporte en Chile bajo escenarios compatibles con 1.5°C. Fuente: Climate Analytics.

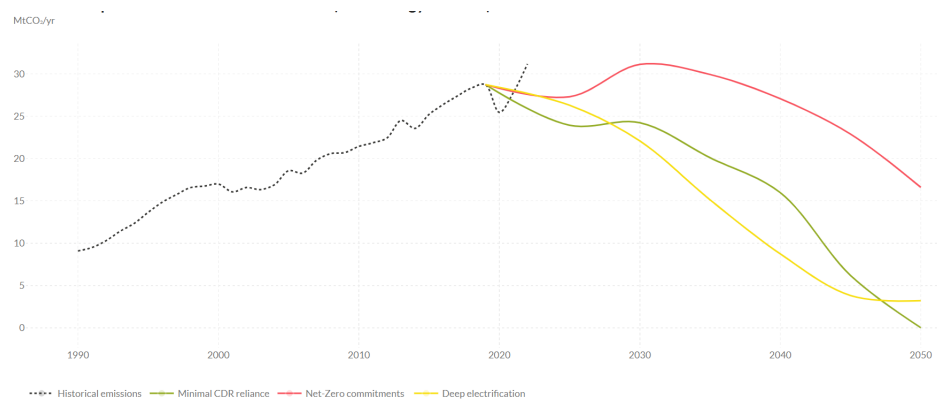


Figura 1.24: Emisiones directas de CO<sub>2</sub> del sector del transporte de Chile bajo escenarios compatibles con 1.5°C. Fuente: Climate Analytics.

## Proyecciones del Programa Giro Limpio

El programa Giro Limpio, es cual es administrado por la Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile y financiado por el Ministerio de Energía, publicó en 2023 una Guía de Proyecciones de Emisiones y Consumos Energéticos en el sector transporte de carga terrestre no ferroviario para el período 2020-2050 [1, 36]. El documento presenta tres escenarios diseñados mediante la metodología STEP 3.0, un modelo de planificación energética del transporte [36].

Comenzando con el primer escenario, este aborda el cumplimiento de los compromisos establecidos en la NDC con incorporación progresiva de tecnologías de cero emisiones. En cuanto al segundo escenario, éste evalúa la implementación de la normativa Euro VII y sus efectos en los consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub>eq. El tercer escenario corresponde a un escenario sin implementación de tecnologías limpias (*Business as Usual*) [1, 36]. Los resultados indican que el transporte de carga por carretera consume el 29.4 % de la energía nacional y genera el 22.6 % de las emisiones de GEI en Chile, y que la implementación de las medidas de los escenarios 1 y 2 puede reducir significativamente estas emisiones para 2050 [1, 36].

### 1.7.4. Herramientas de Modelación: LEAP

El sistema LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*, actualmente denominado *Low Emissions Analysis Platform*) es una herramienta de software ampliamente utilizada para análisis de políticas energéticas y evaluación de mitigación del cambio climático [42, 79, 95]. Este sistema soporta múltiples metodologías de modelación, desde contabilidad de uso final *bottom-up* hasta modelación macroeconómica *top-down* la cual fue explicada con anterioridad y opera con un paso de tiempo anual sobre horizontes típicos de 20 a 50 años [42, 95]. Para el sector transporte, LEAP permite modelar muchas variables incluyendo la demanda por modo (carretera, ferrocarril, aviación, marítimo), la composición de flota por tecnología, el consumo de combustibles por tipo, la penetración de vehículos eléctricos y de cero emisiones, el impacto de políticas de eficiencia y cambio modal, y las emisiones de GEI y contaminantes locales [42, 79, 95]. Al menos 32 países utilizaron LEAP para crear escenarios de energía y emisiones como base para sus NDC bajo el Acuerdo de París, y el software está disponible gratuitamente para organizaciones académicas, gubernamentales y sin fines de lucro de países de ingresos bajos y medios [42, 79].

### 1.7.5. Enfoque Avoid-Shift-Improve

Un marco conceptual ampliamente reconocido para la mitigación de emisiones del transporte es el enfoque *Avoid-Shift-Improve* (ASI), también conocido como Evitar-Cambiar-Mejorar [91, 100]. Este enfoque, adoptado por el IPCC y utilizado extensivamente por consultores y organismos gubernamentales, organiza las estrategias de mitigación en tres pilares: *Avoid*/Evitar (reducir la necesidad de desplazamiento mediante planificación urbana compacta, teletrabajo y logística eficiente); *Shift*/Cambiar (promover el cambio modal hacia modos más eficientes como transporte público, bicicleta y ferrocarril); e *Improve*/Mejorar (optimizar la eficiencia tecnológica mediante vehículos eléctricos, estándares vehiculares más estrictos y combustibles alternativos) [91, 93, 100].

La evidencia creciente muestra que las estrategias de Evitar y Cambiar pueden representar el 40-60 % de las reducciones de emisiones del transporte, a menores costos que las estrategias de Mejorar [93]. Sin embargo, las NDC actualizadas bajo el Acuerdo de París continúan enfocándose predominantemente en medidas de Mejorar (52 % de todas las medidas), mientras que las medidas de Cambiar y Evitar representan el 38 % y 10 % respectivamente [93]. El IPCC AR6 indica que los cambios en la forma urbana (componente Evitar) podrían reducir las emisiones del transporte urbano en 25 % para 2050 comparado con un escenario *business-as-usual* [64].

### 1.7.6. Proyecciones para Aviación y Transporte Marítimo Internacional

En cuanto al sector de aviación internacional, este sector trabaja hacia objetivos ambiciosos de descarbonización bajo la supervisión de ICAO mediante la guía CORSIA la cual fue explicada con anterioridad. La meta aspiracional es lograr alcanzar emisiones netas cero para 2050, mediante la combinación de combustibles sostenibles de aviación (SAF), mejoras de eficiencia operacional, tecnologías de propulsión avanzadas y el mecanismo de compensación CORSIA [43, 45]. Sin medidas adicionales y con el crecimiento proyectado de demanda (4-5 % anual pre-COVID), las emisiones de aviación podrían hasta triplicarse para 2050 [64].

Respecto al transporte marítimo, la Estrategia de la IMO 2023 establece objetivos revisados y más ambiciosos, los cuales incluyen reducción de emisiones totales de GEI de al menos 20 %, esforzándose por 30 % para 2030 respecto a 2008, puntos de



control de 70-80 % de reducción para 2040, y también cero emisiones netas o cercanas a cero para o alrededor de 2050 [57]. Las medidas contempladas incluyen un set de medidas bien pensadas, planificadas y logrables incluyendo estándares de eficiencia energética (EEDI/EEEXI), el indicador CII, combustibles alternativos de cero emisiones (amoníaco verde, metanol verde, hidrógeno), electrificación de operaciones portuarias y optimización de velocidad [57].

## **1.8. Análisis de Incertidumbre en Inventarios de Emisiones**

La cuantificación y el reporte de incertidumbres constituye un componente esencial de los inventarios de emisiones de alta calidad, requerido tanto por las directrices del IPCC como por el marco de reporte bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y la guía EMEP/EEA [23,25,60]. La evaluación de incertidumbre debe entenderse primordialmente como un medio para priorizar los esfuerzos nacionales dirigidos a reducir la incertidumbre de los inventarios y para guiar las decisiones sobre la elección metodológica [25,60].

### **1.8.1. Fuentes de Incertidumbre**

Las incertidumbres en inventarios de emisiones del transporte provienen de múltiples fuentes interrelacionadas, algunas de las cuales se plantean a continuación: Se tiene que en primer lugar, la incertidumbre en los datos de actividad incluye las estadísticas de consumo de combustible, conteos de tráfico vehicular, información de la flota vehicular, kilometraje promedio anual y composición de la flota; En segundo lugar, la incertidumbre en los factores de emisión refleja la variabilidad entre vehículos de una misma categoría, las diferencias entre condiciones de prueba y operación real, la degradación de los sistemas de control de emisiones con la antigüedad del vehículo y el impacto de las condiciones ambientales locales (temperatura, altitud) [1][60][61]. Adicionalmente, la incertidumbre en la desagregación espacial depende fuertemente de la representatividad de las variables *proxy* empleadas, esto puede traer mucho incertidumbre como se ha mencionado anteriormente. La resolución de los datos espaciales disponibles y el desacoplamiento entre la ubicación real de las fuentes emisoras y los *proxies* utilizados también aporta una incertidumbre considerable. La incertidumbre

en la desagregación temporal refleja la representatividad de los perfiles temporales adoptados y la variabilidad interanual no capturada [115, 116].

### 1.8.2. Metodologías de Cuantificación

Las directrices del IPCC establecen un enfoque estructurado para la cuantificación de incertidumbre, que incluye la determinación de incertidumbre para datos de actividad medidos, la evaluación de incertidumbre de factores de emisión, y la agregación de incertidumbres mediante técnicas estadísticas estándar [23, 60]. Para una estimación de emisión  $E = A \times EF$ , la propagación de incertidumbre se realiza mediante:

$$U_E = \sqrt{U_A^2 + U_{EF}^2} \quad (1.12)$$

Donde  $U_E$  es la incertidumbre relativa porcentual de la emisión,  $U_A$  es la incertidumbre relativa del dato de actividad, y  $U_{EF}$  es la incertidumbre relativa del factor de emisión [23, 60]. Esta ecuación asume independencia entre las fuentes de incertidumbre. Para análisis más complejos, se recurre a la simulación de Monte Carlo, que implica definir distribuciones de probabilidad para cada parámetro incierto, realizar miles de iteraciones muestreando aleatoriamente de estas distribuciones, y analizar la distribución resultante de emisiones [23, 25, 60].

Las magnitudes típicas de incertidumbre reportadas en la literatura para el sector transporte son: para transporte terrestre,  $\pm 10$ -20 % para  $\text{CO}_2$  y  $\pm 30$ -60 % para  $\text{NO}_x$  y PM; para transporte marítimo,  $\pm 30$ -50 % en totales; y para transporte aéreo,  $\pm 5$ -10 % para consumo de combustible y  $\pm 2$ -5 % para factores de emisión de  $\text{CO}_2$  [23, 86, 116]. El análisis preliminar de INEMA reveló que los factores de emisión desempeñan un rol dominante en la incertidumbre final de las emisiones, aunque la incertidumbre en los datos de actividad también contribuye de manera relevante [116].

## 1.9. Integración y Aplicaciones

### 1.9.1. Inventarios Integrados Multi-resolución

La tendencia actual en el desarrollo de inventarios de emisiones apunta hacia la integración de múltiples fuentes de información y metodologías para producir conjuntos de datos de alta calidad con cobertura espacial y temporal completa [13, 112]. Un ejemplo destacado es INTAC (*INTEgrated emission inventory of Air pollutants for*

*China*), un inventario integrado con resolución de  $0,1^\circ$  que armoniza datos multi-fuente heterogéneos mediante mapeo de fuentes puntuales, estandarización de nomenclatura de contaminantes, aplicación de perfiles temporales sector-específicos y asignación espacial optimizada [112]. Los resultados de INTAC muestran que la proporción de emisiones asignadas a fuentes puntuales aumenta de 7-19 % en inventarios tradicionales a 48-66 %, con mejoras significativas en el desempeño de modelación de calidad del aire [112].

### **1.9.2. Uso en Modelación de Calidad del Aire**

Este trabajo investigativo es fundamental para los análisis de la calidad del aire, ya que los inventarios de emisiones con alta resolución espacial y temporal son insumos fundamentales para modelos de calidad del aire como WRF-Chem, CMAQ y CAMx. Los requisitos típicos incluyen resolución espacial de 1-12 km para aplicaciones urbanas, resolución temporal horaria o sub-horaria, especiación química de COV en especies individuales, y distribución vertical de emisiones para fuentes elevadas [112]. Estudios de sensibilidad han demostrado que la incertidumbre en inventarios de emisiones es una de las mayores fuentes de incertidumbre en predicciones de calidad del aire, dado que una incertidumbre de  $\pm 30\%$  en emisiones se traduce en  $\pm 20 - 25\%$  en concentraciones predichas, y los errores en la distribución espacial impactan más que los errores en totales [40, 115].

### **1.9.3. Aplicaciones en Evaluación de Políticas**

Los inventarios de emisiones espacial y temporalmente desagregados, combinados con proyecciones al futuro, constituyen herramientas esenales para el diseño correcto y oportuno de políticas de calidad del aire (identificación de zonas críticas y cuantificación de contribuciones sectoriales), la evaluación de co-beneficios clima-aire (cuantificación de beneficios en salud pública derivados de la reducción simultánea de GEI y contaminantes locales), el desarrollo de NDC y estrategias de largo plazo (establecimiento de líneas base, proyección de escenarios y evaluación de factibilidad de metas), la planificación urbana y de transporte (optimización de infraestructura de transporte público, ubicación de estaciones de carga para vehículos eléctricos, diseño de zonas de bajas emisiones), y la evaluación de impacto en salud (estimación de exposición poblacional a contaminantes y cálculo de muertes prematuras atribuibles) [52, 64, 116].

#### **1.9.4. Visualización y Mapas de Calor**

La comunicación efectiva de resultados de inventarios de emisiones a audiencias diversas requiere herramientas de visualización apropiadas. Los mapas de calor, o comúnmente conocidos como *heatmaps*, proporcionan una visualización intuitiva de la distribución espacial de emisiones, permitiendo la identificación rápida de *hotspots*, que son las zonas calientes de emisión, y la comparación entre diferentes contaminantes o escenarios. Las series temporales facilitan la visualización de la evolución temporal y la comparación entre escenarios. Los paneles interactivos (*dashboards*) permiten la exploración de datos y la democratización de la información ambiental [86, 116]. En Chile, tanto INEMA como el inventario realizado por Osses et al. proporcionan sus datos en formato NetCDF, lo que facilita la generación de mapas de calor y otras visualizaciones georreferenciadas [87, 116].

### **1.10. Discusión y Perspectivas Futuras**

#### **1.10.1. Desafíos Actuales**

A pesar de los avances significativos en las metodologías de estimación, desagregación y proyección de emisiones del transporte, persisten desafíos importantes que se deben considerar. En materia de disponibilidad de datos, la información en países en desarrollo continúa siendo limitada, con falta de conteos de tráfico continuos, información de flota vehicular incompleta o desactualizada, y acceso restringido a datos comerciales de GPS y *floating car data*. Asimismo, la calidad y representatividad de los factores de emisión también constituye un desafío persistente, dado que factores desarrollados para condiciones europeas o norteamericanas pueden no ser representativos de las condiciones operacionales de flotas vehiculares en América Latina, donde el parque vehicular suele ser más antiguo y las condiciones de mantenimiento diferentes [86, 116]. Por lo tanto, se hace imperante ajustar estos factores de emisión según las condiciones locales y realidades de cada país, adaptando estos factores de emisión en función de parámetros como el contenido de azufre del combustible que utilicen, composición química y molecular de los combustibles, etc.

Por otro lado, la integración de nuevas tecnologías de transporte representa otro desafío emergente. La modelación de emisiones de vehículos eléctricos (emisiones indirectas por generación eléctrica), la estimación de emisiones de vehículos autónomos

(con patrones de uso aún desconocidos), el impacto de la movilidad compartida (*ride-hailing*, *car-sharing*) y los efectos del teletrabajo post-pandemia requieren adaptaciones metodológicas que aún se encuentran en etapas tempranas de desarrollo [64].

### 1.10.2. Oportunidades Emergentes

Diversas oportunidades emergentes prometen transformar el campo de los inventarios de emisiones. La disponibilidad creciente de *Big Data* proveniente de GPS vehiculares, telefonía móvil, sensores IoT e imágenes satelitales de alta resolución ofrece nuevas posibilidades para la estimación y validación de emisiones en tiempo real. De la misma manera, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático permiten la detección automática y clasificación de vehículos en imágenes, la predicción de patrones de movilidad y la estimación de emisiones mediante el aprendizaje de patrones históricos [35]. La integración de sistemas a través de plataformas de datos de transporte interoperables con APIs para acceso en tiempo real permitirá la actualización automática y más frecuente de inventarios [13].

La validación mediante observaciones satelitales (columnas de NO<sub>2</sub> de TROPOMI/Sentinel-5P, concentraciones de CO de MOPITT/AIRS) ofrece una vía independiente para verificar la consistencia de inventarios *bottom-up*. La modelación integrada, que acopla modelos de transporte, energía, clima y calidad del aire, permite la evaluación holística de políticas y la identificación de sinergias y *trade-offs* entre diferentes objetivos de política pública [40, 64].

### 1.10.3. Necesidades de Investigación para Chile y América Latina

El contexto chileno y latinoamericano presenta necesidades de investigación específicas de acuerdo a lo explicado anteriormente. Es fundamental el desarrollo de factores de emisión locales mediante mediciones en condiciones reales de operación para las flotas vehiculares de la región, considerando las particularidades de combustibles, mantenimiento y condiciones ambientales (altitud, temperatura). Por otro lado se requieren perfiles temporales regionales que reflejen los patrones culturales, laborales y climáticos específicos de Chile y los distintos países de América Latina, diferentes de los perfiles europeos actualmente utilizados como referencia. También la validación sistemática de metodologías de desagregación espacial, incluyendo *benchmarking* con inventarios detallados y cuantificación de errores por resolución, es necesaria para establecer las

mejores prácticas aplicables al contexto regional [86, 116].

## 1.11. Conclusiones del Estado del Arte

La revisión exhaustiva de la literatura permite extraer conclusiones relevantes que fundamentan y orientan la investigación desarrollada en esta tesis. Las metodologías de estimación de emisiones basadas en el producto del nivel de actividad por factores de emisión están bien consolidadas en el marco de las directrices del IPCC, la guía EMEP/EEA, las metodologías de la IMO y el esquema CORSIA de la ICAO, pero continúan evolucionando para incorporar nuevas fuentes de datos, tecnologías de monitoreo y requerimientos de resolución cada vez más finos como lo plantea la literatura científica y los últimos avances obtenidos en esta materia [23, 24, 26, 45, 114].

La desagregación espacial mediante variables *proxy* apropiadas es fundamental para las aplicaciones urbanas y de calidad del aire. La selección de *proxies* tiene un impacto determinante en la precisión del inventario, especialmente a resoluciones finas inferiores a 5 km. El enfoque *bottom-up*, basado en información detallada de ubicación de fuentes, proporciona mayor precisión pero exige datos extensivos. Chile cuenta con contribuciones significativas en esta materia, particularmente el inventario INEMA y los mapas de alta resolución de emisiones del transporte por carretera de Osses et al. [86, 90, 115, 116].

En cuanto a la desagregación temporal, esta permite capturar la variabilidad estacional, semanal y diaria de las emisiones, un aspecto esencial para la modelación de episodios de contaminación y la evaluación de exposición poblacional, permitiendo correlacionar episodios de alta contaminación local con eventos de salud. Las bases de datos CAMS-TEMPO y EDGAR proporcionan perfiles temporales a escala global, pero la adaptación a las condiciones locales de Chile requiere considerar los patrones sociodemográficos, climáticos y culturales específicos del país [12, 39].

Las proyecciones al 2050 muestran divergencias dramáticas entre escenarios, dado que sin intervención, las emisiones del transporte podrían crecer hasta triplicarse al 2050, mientras que escenarios ambiciosos compatibles con 1,5°C requieren reducciones del 59 % o más. Chile ha establecido metas ambiciosas de carbono neutralidad para 2050 con objetivos sectoriales específicos para el transporte, y la evaluación del ICCT sugiere que el país podría alcanzar una trayectoria consistente con el Acuerdo de París si implementa efectivamente sus metas propuestas [2, 52, 64].

La presente investigación se inserta en este contexto de metodologías consolidadas pero en evolución, aprovechando las mejores prácticas internacionales y adaptándolas al contexto chileno, con el objetivo de proporcionar un modelo robusto de desagregación espacial y temporal integrado para los tres modos de transporte (terrestre, marítimo y aéreo), adicionalmente con proyecciones bajo distintos escenarios al 2050, que es el año que Chile estipuló para cumplir con sus acuerdos de carbono neutralidad, acuerdo de paris, etc. Esta contribución precisamente busca generar información científicamente robusta para la toma de decisiones hacia la carbono neutralidad de Chile.

## 2. Materiales y Métodos

Este capítulo presenta la metodología empleada para el desarrollo del modelo de desagregación espacial y temporal de emisiones del transporte chileno, incluyendo la estimación de emisiones de los tres modos de transporte analizados (terrestre, marítimo y aéreo), junto con las proyecciones de emisiones al horizonte 2050. A pesar de que el foco de esta tesis era desarrollar y optimizar modelos de alta resolución espacial y temporal para las emisiones del transporte multimodal en Chile, primero fue necesario trabajar los datos para luego desagregarlos, en otras palabras, primero fue necesario estimar estas emisiones y luego se proyectaron para realizar un trabajo más completo, por lo tanto en este capítulo también se explicará toda la metodología que hay detrás que permitió calcular todo esto.

Para comenzar con una visión general de la metodología llevada a cabo para el desarrollo de esta tesis, y a modo de resumen, se presentan la Figura 2.1 que resume la metodología empleada para el trabajo y procesamiento de los datos del transporte marítimo:

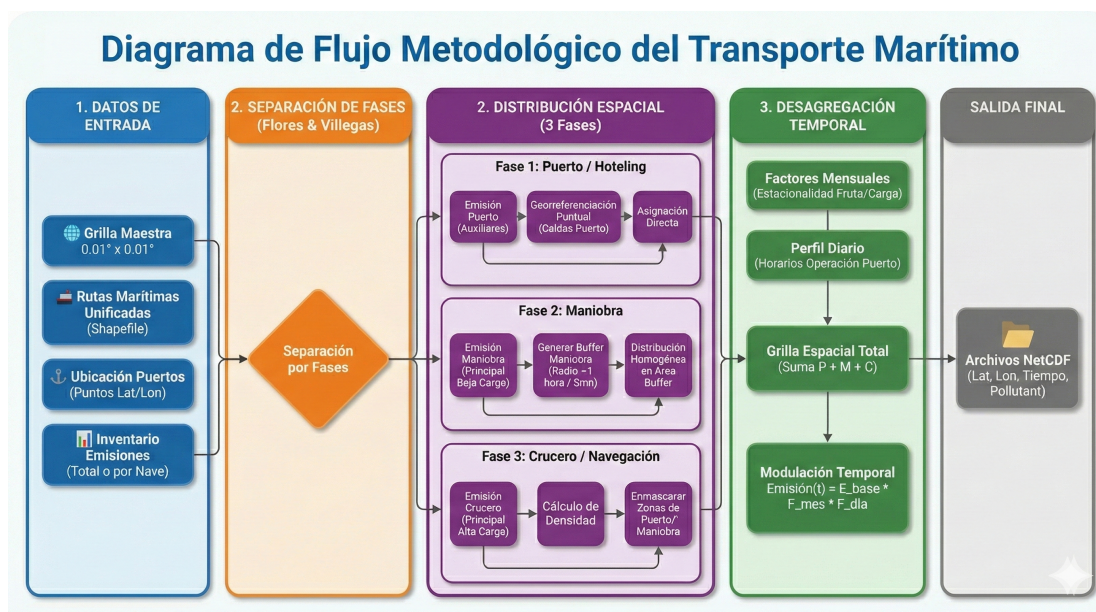


Figura 2.1: Diagrama metodológico del transporte marítimo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2.2 se presenta la metodología general empleada para el trabajo y procesamiento de la data del transporte aéreo.



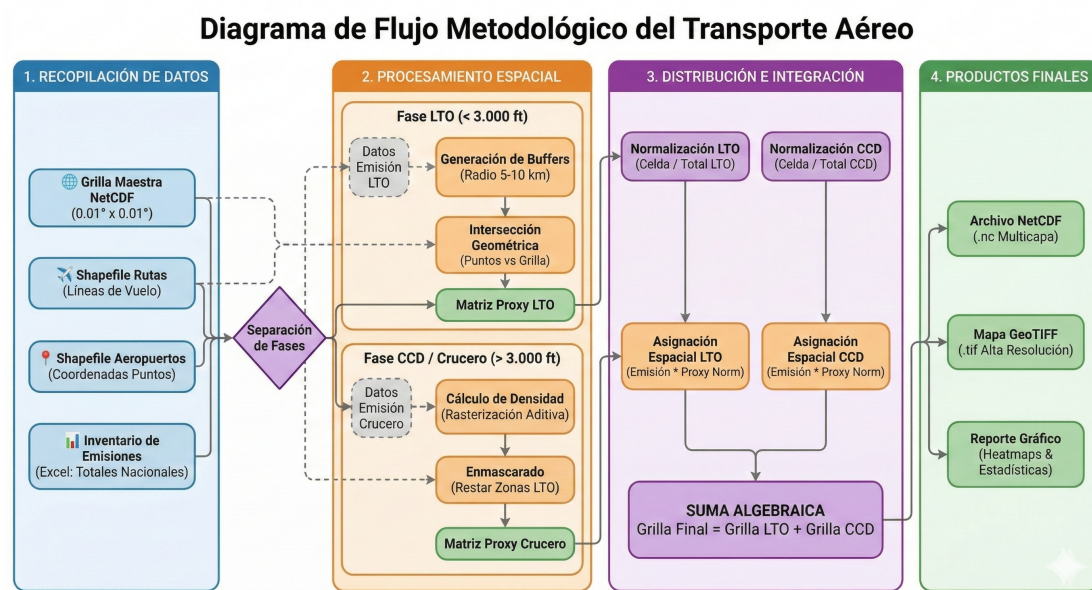


Figura 2.2: Diagrama metodológico del transporte aéreo. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al transporte terrestre, en la Figura 2.3 se presenta la metodología general empleada para el trabajo y procesamiento de la data del transporte terrestre.

La estructura metodológica se organiza en cuatro etapas secuenciales como se muestra en la Figura 2.4: (1) Se comienza con una estimación de emisiones totales para cada modo de transporte, (2) luego se continua con la desagregación espacial de las emisiones sobre la red de rutas de Chile, (3) luego la desagregación temporal en perfiles de resolución sub-anual y (4) finalmente la proyección de emisiones futuras bajo distintos escenarios. Cada etapa se describe en detalle a continuación, explicitando las fuentes de datos utilizadas, las ecuaciones empleadas, los supuestos adoptados y las herramientas computacionales implementadas.

## 2.1. Dominio de Estudio y Alcance

El dominio de estudio se muestra en la Figura 2.5 y abarca el territorio continental de Chile, comprendido entre los 17,5° S y los 56,0° S de latitud y entre los 66,0° W y los 75,5° W de longitud. Este dominio cubre las 16 regiones político-administrativas del país, desde la Región de Arica y Parinacota por el norte hasta la Región de Magallanes y la Antártica Chilena por el sur, e incluye la totalidad de la red vial, los puertos marítimos principales y secundarios, y los aeropuertos y aeródromos del territorio

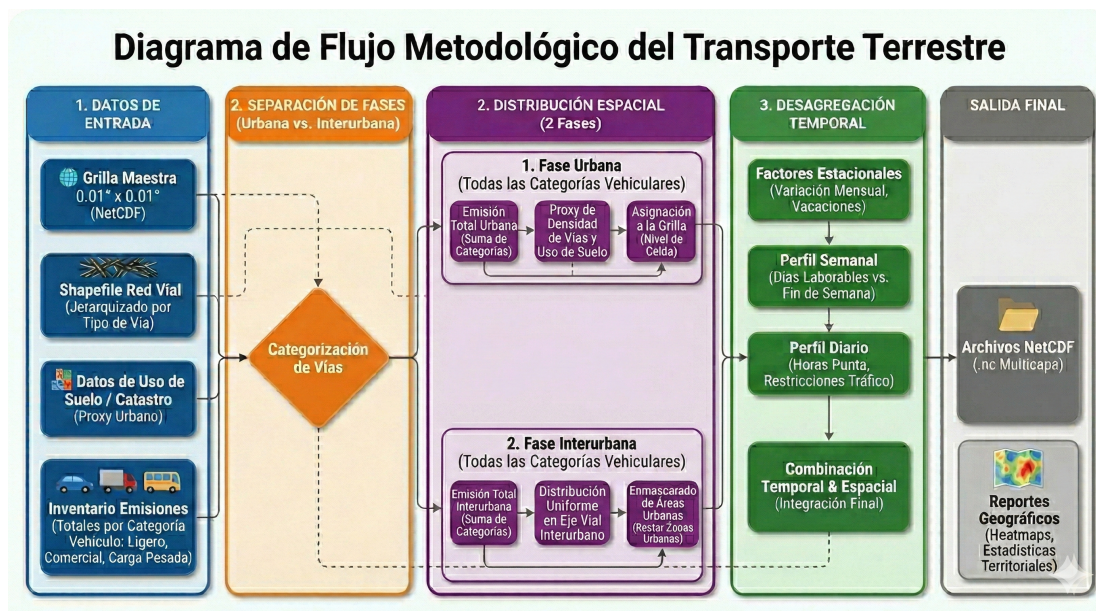


Figura 2.3: Diagrama metodológico del transporte terrestre. Fuente: Elaboración propia.

nacional [86, 116].

El análisis contempla tres modos de transporte como se dijo con anterioridad: en primer lugar, se comienza con el transporte terrestre, el cual incluye vehículos livianos de pasajeros, vehículos comerciales livianos, taxis, buses urbanos y de *intercity*, camiones de distinta envergadura, motocicletas, etc.; luego tenemos el transporte marítimo, que comprende buques de carga (portacontenedores, graneleros, petroleros), naves de pasajeros, remolcadores y embarcaciones auxiliares que operan en puertos chilenos y rutas costeras; y finalmente el transporte aéreo, que abarca la aviación comercial doméstica e internacional operando desde los aeropuertos del país.

Los contaminantes estimados incluyen dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), compuestos orgánicos volátiles ( $\text{COV}$  o  $\text{VOC}$  por sus siglas en inglés), material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), carbono negro ( $\text{CN}$ ), entre otros, según la disponibilidad de factores de emisión para cada modo de transporte.

Respecto a la resolución espacial, la resolución espacial del inventario grillado se establece en  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  de latitud y longitud, lo que equivale a celdas de aproximadamente  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  en la latitud media de Chile. Esta resolución es consistente con las empleadas en estudios internacionales y fue la misma empleada por Osses et al. [86] y Álamos et al. [116] en los inventarios nacionales de referencia (INEMA), dado que

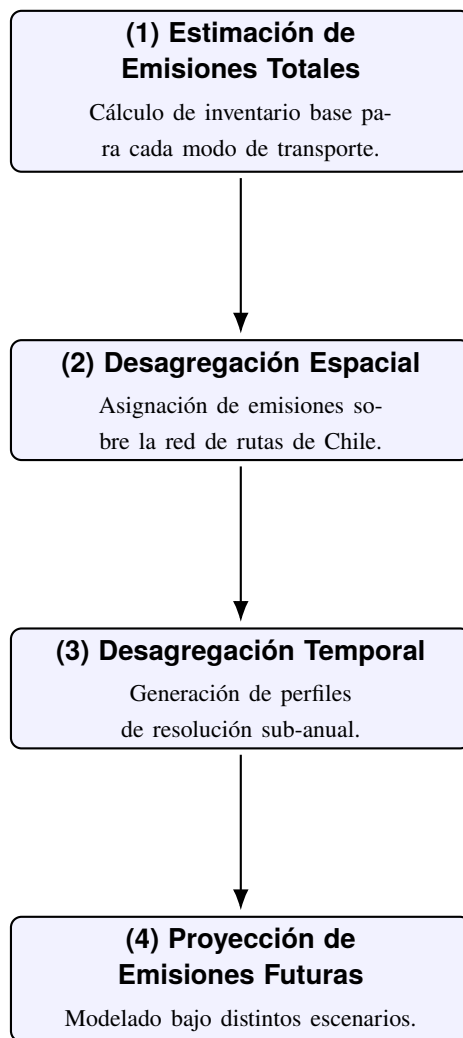


Figura 2.4: Diagrama de flujo de la estructura metodológica general en cuatro etapas secuenciales.

resulta adecuada para capturar la variabilidad espacial de las emisiones del transporte a nivel urbano e interurbano. El período base de análisis corresponde al año más reciente con datos completos disponibles, mientras que las proyecciones se extienden hasta el año 2050.

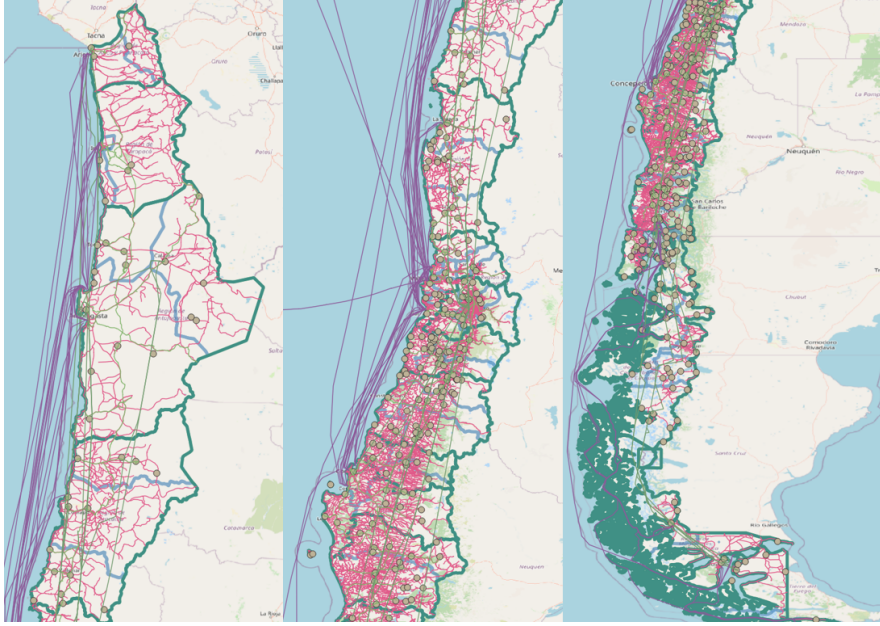


Figura 2.5: Mapa del dominio de estudio mostrando las 16 regiones de Chile, la red vial principal, las rutas marítimas, rutas aéreas y aeropuertos. Elaborado con base en datos de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), OpenStreetMap y datos de elaboración propia.

## 2.2. Estimación de Emisiones del Transporte Terrestre

### 2.2.1. Ecuación Fundamental de Cálculo

La estimación de emisiones del transporte terrestre se basa en el enfoque *bottom-up* establecido por las directrices del IPCC 2006 (nivel *Tier 3*) y la guía metodológica EMEP/EEA [23, 24], consistente en la multiplicación del nivel de actividad vehicular por los factores de emisión correspondientes. Para cada contaminante  $n$ , las emisiones se calculan mediante la ecuación [86]:

$$EMIS_{n,m,l,k,j,i} = \sum VKT_{i,j,k,l,m} \times EF_{i,j,k,l,m,n} \quad (2.1)$$

Donde  $VKT_{i,j,k,l,m}$  son los vehículos-kilómetro recorridos por vehículos del tipo vehicular  $i$ , en la región  $j$ , clase de vía  $k$  (urbana o interurbana), subcategoría de combustible  $l$  y estándar de emisión  $m$ ; y  $EF_{i,j,k,l,m,n}$  es el factor de emisión del contaminante  $n$  expresado en gramos por kilómetro (g/km), para las mismas categorías. Este cálculo se realiza de manera desagregada para cada una de las 70 combinaciones de

tipo vehicular resultantes de considerar 10 categorías vehiculares, 2 tipos de combustible y 7 estándares de emisión Euro [86].

## 2.2.2. Fuentes de Datos de Actividad

### Composición de la Flota Vehicular

La composición de la flota vehicular se construye a partir de la Encuesta Anual de Vehículos en Circulación des (INE), I Instituto Nacional de Estadística que reporta el número total de vehículos con permiso de circulación vigente por región política [48,86]. Para el año 2024, el parque vehicular nacional totalizó 6.727.472 unidades, con un crecimiento del 2.9 % respecto a 2023 [48]. Las categorías vehiculares reportadas por el INE se agrupan en las siguientes clases funcionales, estableciendo una correspondencia con las categorías del modelo COPERT 5 como se muestra en las Tablas 2.1 y 2.6 [86]:

- Vehículos livianos de pasajeros (VLP): automóviles, *station wagon*, *jeep*, taxi — equivalentes a *Passenger Cars* (M1) de COPERT.
- Vehículos comerciales livianos (VLC): furgones, camionetas, minibuses — equivalentes a *Light Commercial Vehicles* (N1).
- Buses urbanos estándar (UBS), articulados (UBA) e interurbanos (ICB).
- Camiones: livianos (LDT,  $\leq 14$  t), medianos (MDT, 14-28 t) y pesados (HDT,  $> 28$  t).
- Motocicletas y similares (MOT): categoría L de COPERT.

Cada categoría se subdivide según el tipo de combustible utilizado (gasolina o diésel), empleando información del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) y la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA), y también según el estándar tecnológico de emisión en su equivalente europeo (pre-Euro, Euro 1 a Euro 6 para vehículos livianos, y Euro I a Euro VI para vehículos pesados). La asignación del estándar Euro se determina a partir de los decretos supremos que regulan la entrada de vehículos nuevos al país (DS 82/93MTT, DS 54/94MTT, DS 55/94MTT, DS 130/2002MTT, DS 4/2012MMA), los cuales establecen requisitos diferenciados por región y categoría vehicular [86]. La distribución entre actividad urbana e interurbana por región se basa en proporciones regionales establecidas por Osses et al. [99] en su estudio citado con anterioridad.



Tabla 2.1: Equivalencia de las categorías principales de vehículos en Europa y Chile.  
HDT denota camión de carga pesada (heavy-duty truck).

| Europe COPERT                                           | Chile INE                            | Code |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|------|
| Passenger cars (diesel and gasoline, $M_1$ )            | Automóvil, station wagon, jeep, taxi | LPV  |
| Light commercial vehicles (diesel and gasoline, $N_1$ ) | Furgón, camioneta, minibús           | LCV  |
| Urban bus standard, Urban bus midi                      | Bus, taxibús                         | UBS  |
| Urban articulated bus                                   | Bus                                  | UBA  |
| Intercity bus (coach standard)                          | Bus                                  | ICB  |
| HDT (rigid $\leq 14$ t)                                 | Camión                               | LDT  |
| HDT (rigid 14–28 t)                                     | Camión                               | MDT  |
| HDT (rigid $> 28$ t and articulated)                    | Camión, camión con remolque          | HDT  |
| L category (motorcycles)                                | Motocicletas y similares             | MOT  |

| Segmento chileno                                 | Segment Copert                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vehículo liviano de pasajeros (VLP) y Taxi (TAX) | Medium                                                                                                                                                                                 |
| Vehículo liviano comercial (VLC)                 | N1-II                                                                                                                                                                                  |
| Camión liviano (CAM LIV)                         | Rigid $\leq 7.5$ t<br>Rigid 7.5 - 12 t<br>Rigid 12 - 14 t                                                                                                                              |
| Camión medio rígido (CAM MED)                    | Rigid 14 - 20 t<br>Rigid 20 - 26 t<br>Rigid 26 - 28 t                                                                                                                                  |
| Camión pesado rígido y articulado (CAM PES)      | Rigid 28 - 32 t<br>Rigid $>32$ t<br>Articulated 14 - 20 t<br>Articulated 20 - 28 t<br>Articulated 28 - 34 t<br>Articulated 34 - 40 t<br>Articulated 40 - 50 t<br>Articulated 50 - 60 t |
| Bus rígido (BUS RIG)                             | Urban Buses Standard 15 - 18 t                                                                                                                                                         |
| Bus articulado (BUS ART)                         | Urban Buses Articulated $>18$ t                                                                                                                                                        |
| Bus interprovincial (BUS INT PROV)               | Coaches Standard $\leq 18$ t                                                                                                                                                           |
| Motocicletas (MOT)                               | Motorcycles 4-stroke $< 250$ cm <sup>3</sup><br>Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup><br>Motorcycles 4-stroke $> 750$ cm <sup>3</sup>                                         |

Figura 2.6: Segmentos vehiculares y su equivalente en COPERT

### Nivel de Actividad Vehicular (VKT)

El nivel de actividad vehicular se expresa en vehículos-kilómetro recorridos (VKT) y se calcula como la suma del producto entre el número de vehículos por tipo y el kilometraje anual promedio por vehículo [86]:

$$VKT = \sum N_{i,j,k} \times KM_{i,j,k} \quad (2.2)$$

Donde  $N_{i,j,k}$  es el número de vehículos del tipo  $i$  en la región  $j$  y clase de vía  $k$ , y  $KM_{i,j,k}$  es el kilometraje anual por vehículo (km/año/vehículo) para la misma combinación. Los valores de kilometraje anual se obtienen de estimaciones previas calibradas para Chile [86, 99], diferenciados por categoría vehicular y región. Los valores típicos oscilan entre 7.284 km/año para vehículos livianos en la Región de Magallanes (XII) y 14.956 km/año en la Región Metropolitana (XIII), reflejando las diferencias en las distancias de desplazamiento y la densidad del tejido urbano [86].

### Calibración con Ventas de Combustible

El consumo total de combustible (TFC) calculado a partir de la actividad vehicular se contrasta con las ventas reales de combustible reportadas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) para cada región [86]. El TFC se calcula mediante:

$$TFC = \frac{\sum [AL_{i,j,k,l,m} \times N_{i,j} \times X1_{i,j,k} \times X2_{i,j,l} \times X3_{i,j,m}]}{FC_{i,j,k,l,m}} \quad (2.3)$$

Donde  $AL$  es el nivel de actividad anual (km/año/vehículo),  $N$  es el número de vehículos registrados,  $X1$  es la fracción por subcategoría,  $X2$  es la proporción de circulación urbana/interurbana,  $X3$  es el porcentaje por tecnología de emisión, y  $FC$  es el consumo específico de combustible (km/litro). La razón entre las ventas reales de combustible (datos SEC) y el TFC calculado se utiliza como factor de corrección (MCF, *mass correction factor*), parametro importante ya que permite ajustar el número efectivo de vehículos activos en cada región [86]. Este procedimiento permite reconciliar el inventario *bottom-up* con las estadísticas energéticas nacionales, siguiendo la práctica recomendada por las directrices del IPCC para la verificación de inventarios de GEI [23].

### 2.2.3. Factores de Emisión

Los factores de emisión para el transporte terrestre se obtienen del modelo COPERT 5 (*Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport*, versión 5), desarrollado por EMISIA S.A. bajo coordinación de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC) [26, 27, 86]. COPERT 5 implementa la metodología EMEP/EEA para inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos del transporte por carretera [24, 29], y sus factores de emisión se basan en mediciones de emisiones en condiciones reales de conducción (*Real Driving Emissions*, RDE) [101].

Los factores de emisión de COPERT 5 se expresan principalmente en gramos por kilómetro y dependen de la categoría vehicular, el tipo de combustible, el estándar Euro, la velocidad promedio de circulación y las condiciones de operación. Para la adaptación al contexto chileno, se consideran las velocidades promedio de desplazamiento por región y tipo de vía (urbana e interurbana), obtenidas de estudios previos de SECTRA y de la Universidad Técnica Federico Santa María [86, 99]. La adaptación incluye además la calidad y composición del combustible local (contenido de azufre en diésel y gasolina según los decretos supremos vigentes) y las condiciones de altitud y temperatura de las distintas zonas geográficas de Chile.

Los contaminantes modelados mediante COPERT 5 incluyen las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2,5</sub> y NMVOC, entre otros, con factores de emisión que disminuyen progresivamente a medida que aumenta la exigencia del estándar Euro. COPERT 5 incorpora además correcciones por edad del vehículo para las categorías Euro 3 y 4 de vehículos livianos, aplicables a COV, CO y NO<sub>x</sub> [86]. Los factores de emisión de CH<sub>4</sub> provienen de reportes complementarios de la USEPA y de Ntziachristos et al. [80]. Para el carbono negro (CN), dado que COPERT 5 no modela directamente este contaminante, los factores de emisión se derivan a partir de la fracción de CN en el PM<sub>2,5</sub>, diferenciada por categoría vehicular, motorización y tecnología [86]:

$$EF_{CN} = EF_{PM} \times F_{2,5} \times F_{CN} \quad (2.4)$$

Donde  $EF_{PM}$  es el factor de emisión de material particulado total del escape,  $F_{2,5}$  es la fracción másica de partículas con diámetro aerodinámico  $\leq 2,5 \mu m$  (valor utilizado: 0.9), y  $F_{CN}$  es la fracción de carbono negro en dichas partículas, que varía entre 15 % y 87 % según la categoría vehicular y el estándar Euro [86].



Para ser mas exactos, una vez que se ha segmentado y filtrado la información correspondiente al parque automotriz chileno, la estimación de los Factores de Emisión (FE) se realiza aplicando la siguiente formulación matemática:

$$FE = \frac{\alpha \cdot V^2 + \beta \cdot V + \gamma + \delta/V}{\varepsilon \cdot V^2 + \zeta \cdot V + \eta} \quad (2.5)$$

En esta ecuación, los parámetros  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$  y  $\eta$  corresponden a constantes empíricas establecidas por el modelo COPERT, las cuales dependen de la categoría del vehículo. Por su parte,  $V$  representa la velocidad promedio de circulación, cuyo valor se extrae de los registros de velocidad correspondientes. La derivación detallada de estas constantes se puede consultar en la literatura de referencia.

Es fundamental recalcar que la Ecuación 2.5 está diseñada específicamente para calcular los FE de contaminantes como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y compuestos orgánicos volátiles (VOC) en unidades de  $[\text{g}/\text{km}]$ . De igual forma, permite estimar el factor de consumo energético, denominado EC (o FC), expresado en  $[\text{MJ}/\text{km}]$ . Este último parámetro es clave para determinar las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  a través de las relaciones que se detallan a continuación:

$$FC_i = \frac{10^3 \cdot EC_i \cdot 0,239}{\dot{q}_i} \quad (2.6)$$

Donde las variables involucradas se definen como:

- $FC_i$ : Gasto de combustible del tipo  $i$ , expresado en  $[\text{g}/\text{km}]$ .
- $EC_i$ : Gasto energético derivado de los datos de entrada para el combustible  $i$ , en  $[\text{MJ}/\text{km}]$ .
- $\dot{q}_i$ : Poder calorífico específico del combustible  $i$ , medido en  $[\text{Kcal}/\text{g}]$ .

A partir de lo anterior, el factor para el dióxido de carbono se calcula como:

$$FE_{\text{CO}_2,i} = 44,011 \cdot \frac{FC_i}{12,011 + 1,008 \cdot R_{\text{HC},i} + 16,000 \cdot R_{\text{OC},i}} \quad (2.7)$$

En esta expresión,  $R_{\text{HC},i}$  y  $R_{\text{OC},i}$  representan las relaciones másicas de hidrógeno-carbono y oxígeno-carbono, respectivamente, para el combustible  $i$ , valores que se obtienen de las tablas de referencia del modelo.

Para el caso del dióxido de azufre, la formulación es la siguiente:

$$FE_{SO_2,i} = 2 \cdot KS_i \cdot FC_i \quad (2.8)$$

Donde  $KS_i$  indica la proporción de azufre por cada kilogramo de combustible  $i$ . En el contexto de Chile, este parámetro asume un valor de  $5 \times 10^{-5}$  [kg/kg].

Por otro lado, la estimación de los FE para  $N_2O$  y  $NH_3$  se rige por la siguiente ecuación:

$$FE_{N_2O-NH_3} = (a \cdot KM + b) \cdot \frac{EF_{base}}{1000} \quad (2.9)$$

Aquí,  $EF_{base}$  es el factor base en [mg/km], mientras que  $a$  y  $b$  son constantes adimensionales que varían en función del contenido de azufre del carburante. La variable  $KM$  representa el kilometraje acumulado anual para la categoría vehicular en estudio. Cabe mencionar que los valores de  $EF_{base}$ ,  $a$  y  $b$  difieren entre el  $N_2O$  y el  $NH_3$ , motivo por el cual se procesan mediante archivos de entrada separados.

Para determinar las emisiones de  $NO$  y  $NO_2$ , el procedimiento es directo. Consiste en multiplicar el factor de emisión total de  $NO_x$  por las fracciones correspondientes de  $NO$  o  $NO_2$ , las cuales dependen del modo de conducción y de la tipología del vehículo:

$$FE_{NO} = \%NO \cdot FE_{NO_x} \quad (2.10)$$

$$FE_{NO_2} = \%NO_2 \cdot FE_{NO_x} \quad (2.11)$$

En lo que respecta al Carbono Negro (BC), es imperativo efectuar primero un ajuste sobre los FE del material particulado (PM), dado que algunas fuentes los reportan en unidades de energía ([g/kWh]). La conversión a unidades de distancia ([g/km]) se realiza de la siguiente manera:

$$FE_{PM^*} = EC \cdot FE_{PM_{kwh}} \quad (2.12)$$

Donde  $FE_{PM^*}$  representa el factor de emisión de PM ajustado en [g/km],  $EC$  es el consumo de energía previamente definido, y  $FE_{PM_{kwh}}$  son los factores de emisión originales basados en la energía. Una vez homologadas las unidades, el cálculo del BC sigue una lógica análoga a la de los óxidos de nitrógeno:

$$FE_{BC} = \%BC \cdot FE_{PM^{**}} \quad (2.13)$$

En esta ecuación,  $FE_{PM^{**}}$  agrupa la totalidad de los factores de emisión de material particulado (incluyendo los ajustados). El coeficiente  $\%BC$  se obtiene de los manuales de referencia asociados al modelo. Finalmente, aunque los FE de los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) se obtienen de manera global para la flota, es factible disgregarlos en sus componentes individuales (por ejemplo, propano, butano, etano, entre otros). Esto se logra aplicando fracciones específicas al total estimado:

$$VOC_i = FE_{VOCs} \cdot \%VOC_i \quad (2.14)$$

Donde el subíndice  $i$  denota la especie particular de VOC,  $FE_{VOCs}$  es el factor de emisión global calculado previamente, y  $\%VOC_i$  representa la participación porcentual de esa especie dentro del total de compuestos orgánicos.

Con toda esta metodología y teoría, en las Tablas 2.2 y 2.3 se presentan los factores de emisión usados en esta investigación.

Como se mencionó anteriormente, es importante recalcar que para determinar con precisión las emisiones de Carbono Negro (BC) a partir del material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ), es necesario conocer la proporción existente entre ambos contaminantes. Esta relación varía significativamente dependiendo del tipo de vehículo, el combustible utilizado y la normativa de emisiones bajo la cual fue fabricado. A continuación, las Tablas 2.4 y 2.5 detallan las fracciones porcentuales utilizadas para caracterizar estas tecnologías en el contexto de la flota vehicular chilena.

Tabla 2.2: Factores de emisión utilizados para diferentes compuestos en Chile (Parte 1: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2,5</sub>). Los números 0–6 indican las normas Euro, y las letras G y D corresponden a gasolina y diésel.

| Vehicle ID    | CO <sub>2</sub> [g km <sup>-1</sup> ] | NO <sub>x</sub> [g km <sup>-1</sup> ] | PM <sub>2,5</sub> [g km <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>-3</sup> |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| LPV0G / LPV0D | 262.2 / 179.77                        | 2.41 / 0.53                           | 2.56 / 197.83                                             |
| LPV1G / LPV1D | 186.02 / 155.99                       | 0.33 / 0.64                           | 2.56 / 72.31                                              |
| LPV3G / LPV3D | 189.48 / 155.06                       | 0.06 / 0.74                           | 1.23 / 34.21                                              |
| LPV4G / LPV4D | 195.82 / 155.06                       | 0.04 / 0.56                           | 1.23 / 28.59                                              |
| LPV5G / LPV5D | 195.82 / 155.06                       | 0.02 / 0.59                           | 1.42 / 2.24                                               |
| LPV6G / LPV6D | 195.82 / 155.06                       | 0.02 / 0.48                           | 1.5 / 1.57                                                |
| LCV0G / LCV0D | 254.6 / 263.84                        | 2.95 / 1.69                           | 2.56 / 304.63                                             |
| LCV1G / LCV1D | 298.68 / 236.59                       | 0.45 / 1.19                           | 2.56 / 96.94                                              |
| LCV3G / LCV3D | 298.68 / 236.59                       | 0.09 / 1                              | 1.23 / 64.95                                              |
| LCV4G / LCV4D | 298.68 / 236.59                       | 0.04 / 0.81                           | 1.23 / 33.93                                              |
| LCV5G / LCV5D | 176.44 / 222.44                       | 0.01 / 1.3                            | 1.79 / 1.15                                               |
| LCV6G / LCV6D | 176.44 / 222.44                       | 0.01 / 1.05                           | 1.79 / 1.15                                               |
| LDT0 / HDT0   | 493.01 / 944.4                        | 6.51 / 11.7                           | 307.78 / 456.57                                           |
| LDT1 / HDT1   | 422.69 / 809.91                       | 4.16 / 8.26                           | 159.18 / 358.77                                           |
| LDT2 / HDT2   | 405.64 / 784.26                       | 4.48 / 9.02                           | 83.67 / 172.92                                            |
| LDT3 / HDT3   | 427.7 / 816.16                        | 3.53 / 7.29                           | 79.58 / 176.38                                            |
| LDT4 / HDT4   | 413.89 / 774.93                       | 2.41 / 4.94                           | 19.2 / 38.47                                              |
| LDT5 / HDT5   | 398.37 / 754.6                        | 2.43 / 5.1                            | 22.83 / 49.14                                             |
| LDT6 / HDT6   | 406.46 / 765.95                       | 0.17 / 0.39                           | 2.27 / 4.82                                               |
| USB0          | 1053.64                               | 14.97                                 | 648.87                                                    |
| USB1          | 899.39                                | 9.2                                   | 355.07                                                    |
| USB2          | 872.14                                | 9.9                                   | 178.03                                                    |
| USB3 / UAB3   | 914.04 / 1277.34                      | 8.33 / 11.91                          | 172.38 / 239.89                                           |
| USB5 / UAB5   | 821.83 / 1157.95                      | 5.54 / 6.57                           | 49.53 / 67.73                                             |
| USB6 / UAB6   | 847.25 / 1186.81                      | 0.37 / 0.41                           | 4.83 / 6.27                                               |
| MOT1 / MOT2   | 94.2 / 94.2                           | 0.04 / 0.05                           | 80 / 40                                                   |
| MOT3 / MOT5   | 55.6 / 55.26                          | 0.05 / 0.03                           | 12 / 12                                                   |

Tabla 2.3: Factores de emisión utilizados para diferentes compuestos en Chile (Parte 2: BC, CO, VOCs). Los números 0–6 indican las normas Euro, y las letras G y D corresponden a gasolina y diésel.

| Vehicle ID    | BC [g km <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>-3</sup> | CO [g km <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>-2</sup> | VOCs [g km <sup>-1</sup> ] ×10 <sup>-2</sup> |
|---------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| LPV0G / LPV0D | 0.76 / 59.35                               | 2569.67 / 60.41                            | 217.42 / 13.4                                |
| LPV1G / LPV1D | 0.76 / 21.69                               | 186.82 / 37.52                             | 16.96 / 4.77                                 |
| LPV3G / LPV3D | 0.37 / 10.26                               | 69.02 / 8.02                               | 1.85 / 1.65                                  |
| LPV4G / LPV4D | 0.37 / 8.57                                | 28.37 / 7.58                               | 1.33 / 1.08                                  |
| LPV5G / LPV5D | 0.42 / 0.67                                | 29.57 / 3.92                               | 0.64 / 0.09                                  |
| LPV6G / LPV6D | 0.45 / 0.47                                | 26.34 / 5.25                               | 0.67 / 0.09                                  |
| LCV0G / LCV0D | 0.76 / 91.38                               | 1667.32 / 118.4                            | 160.6 / 12.64                                |
| LCV1G / LCV1D | 0.76 / 29.08                               | 454.88 / 49.93                             | 18.88 / 12.64                                |
| LCV3G / LCV3D | 0.37 / 19.48                               | 236.54 / 40.94                             | 2.64 / 7.84                                  |
| LCV4G / LCV4D | 0.37 / 10.17                               | 127.36 / 32.45                             | 1.13 / 2.9                                   |
| LCV5G / LCV5D | 0.53 / 0.34                                | 54.73 / 0.02                               | 0.7 / 0.01                                   |
| LCV6G / LCV6D | 0.53 / 0.34                                | 54.73 / 0.02                               | 0.7 / 0.01                                   |
| LDT0 / HDT0   | 92.33 / 136.97                             | 209.78 / 242.71                            | 97.88 / 74.69                                |
| LDT1 / HDT1   | 47.75 / 107.63                             | 88.52 / 197.02                             | 29.37 / 66.55                                |
| LDT2 / HDT2   | 25.1 / 51.87                               | 73.75 / 161.41                             | 19.51 / 44.54                                |
| LDT3 / HDT3   | 23.87 / 52.91                              | 85.59 / 194.45                             | 18.06 / 41.21                                |
| LDT4 / HDT4   | 5.76 / 11.54                               | 43.74 / 93.83                              | 2.62 / 5.45                                  |
| LDT5 / HDT5   | 6.85 / 14.74                               | 83.13 / 172.56                             | 1.06 / 2.78                                  |
| LDT6 / HDT6   | 0.68 / 1.44                                | 10.45 / 16.27                              | 1.64 / 3.67                                  |
| USB0          | 194.66                                     | 466.39                                     | 157.8                                        |
| USB1          | 106.52                                     | 218.14                                     | 64.99                                        |
| USB2          | 53.41                                      | 187.25                                     | 44.45                                        |
| USB3 / UAB3   | 51.71 / 71.96                              | 203.87 / 323                               | 40.92 / 52.51                                |
| USB5 / UAB5   | 14.86 / 20.32                              | 204.83 / 305.32                            | 2.74 / 3.72                                  |
| USB6 / UAB6   | 1.45 / 1.88                                | 21.45 / 25.49                              | 3.58 / 4.63                                  |
| MOT1 / MOT2   | 24 / 12                                    | 1298.98 / 1027.62                          | 326.26 / 173.26                              |
| MOT3 / MOT5   | 3.6 / 3.6                                  | 1027.62 / 533.51                           | 173.26 / 97.75                               |

Tabla 2.4: Fracciones de BC/PM<sub>2,5</sub> para las tecnologías de emisión de vehículos en Chile (Pre-Euro a Euro III/3).

| Categoría de vehículo                               | Pre-Euro | Euro I/1 | Euro II/2 | Euro III/3 |
|-----------------------------------------------------|----------|----------|-----------|------------|
|                                                     | [ %]     | [ %]     | [ %]      | [ %]       |
| Bus                                                 | 50       | 65       | 65        | 70         |
| Camión ligero                                       | 55       | 70       | 80        | 85         |
| Camión mediano                                      | 47       | 70       | 81        | 72         |
| Camión pesado                                       | 50       | 65       | 65        | 70         |
| Vehículo comercial y de pasajeros ligero diésel     | 47       | 70       | 80        | 72         |
| Vehículo comercial y de pasajeros ligero a gasolina | 30       | 25       | 25        | 25         |

*Nota:* La notación con números romanos se aplica a vehículos pesados, y los números arábigos se aplican a vehículos comerciales ligeros y de pasajeros.

Tabla 2.5: Fracciones de BC/PM<sub>2,5</sub> para las tecnologías de emisión de vehículos en Chile (Euro IV/4 a Euro VI/6).

| Categoría de vehículo                               | Euro IV/4 | Euro V/5 | Euro VI/6 |
|-----------------------------------------------------|-----------|----------|-----------|
|                                                     | [ %]      | [ %]     | [ %]      |
| Bus                                                 | 75        | 75       | 15        |
| Camión ligero                                       | 87        | 10       | 29        |
| Camión mediano                                      | 69        | 23       | 25        |
| Camión pesado                                       | 75        | 75       | 15        |
| Vehículo comercial y de pasajeros ligero diésel     | 69        | 25       | 25        |
| Vehículo comercial y de pasajeros ligero a gasolina | 15        | 17       | 17        |

*Nota:* La notación con números romanos se aplica a vehículos pesados, y los números arábigos se aplican a vehículos comerciales ligeros y de pasajeros.

## 2.3. Estimación de Emisiones del Transporte Aéreo

Respecto a la estimación de emisiones contaminantes generadas por la industria aeronáutica comercial, esta requiere un enfoque metodológico riguroso que considere las distintas fases operacionales del vuelo y las características técnicas de cada aeronave. La determinación precisa requiere un análisis segmentado de la operación de las aeronaves. Al igual que en el transporte terrestre, donde los factores de emisión varían según la velocidad y el tipo de vía, los motores de aviación operan bajo distintas condiciones de empuje y altitud a lo largo de un viaje completo, lo que consecutivamente altera significativamente sus tasas de emisión. Justamente, para abordar esta complejidad metodológica, se ha adoptado una aproximación basada en la división del ciclo de vuelo en fases operativas distintas. Como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.7, el perfil de misión típico de una aeronave comercial abarca desde el rodaje inicial hasta la llegada final al terminal.

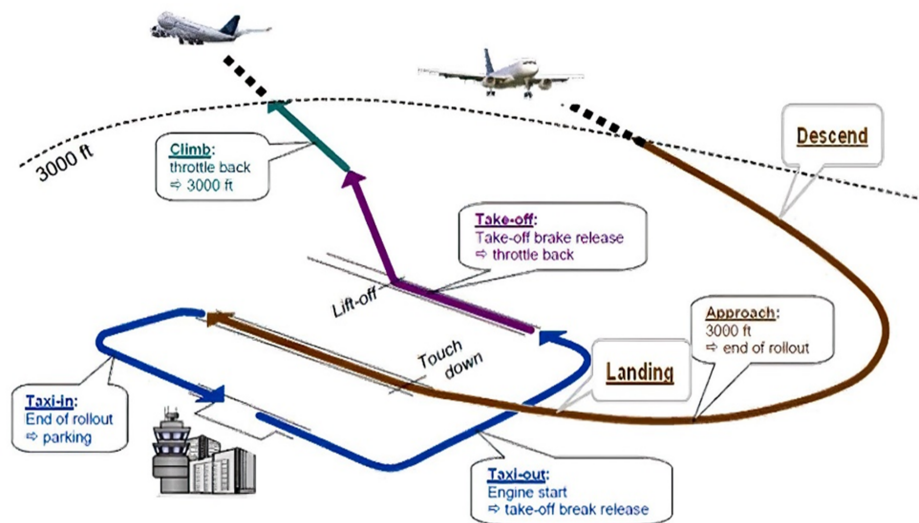


Figura 2.7: Diagrama esquemático de las fases de operación de una aeronave comercial durante un ciclo de vuelo completo. Se distinguen las fases de despegue y aterrizaje (LTO) de la fase de crucero (CCD).

En la metodología empleada en esta investigación, se distinguen fundamentalmente dos segmentos, por una lado se tiene la fase de ciclo de despegue y aterrizaje (LTO, por sus siglas en inglés), que incluye las fases de taxi-out, despegue, ascenso inicial y las fases de aproximación, aterrizaje y \*taxi-in\* (todas ellas por debajo de los 3000 pies o 1000 metros), y por otro lado se tiene la fase de crucero (que engloba el as-

censo principal, el crucero propiamente dicho y el descenso inicial a gran altitud). Esta segmentación permite aplicar factores de emisión específicos para cada condición operativa y cuantificar el impacto local y global del transporte aéreo correctamente, considerando los factores de carga de cada fase, consumo de combustible, etc. Por lo tanto la aproximación metodológica se fundamenta en la segregación de las operaciones de vuelo en dos grandes categorías: el ciclo LTO (Landing and Take-Off) y las fases CCD (Cruise-Climb-Descent). Esta distinción resulta esencial dado que los patrones de emisión varían significativamente según el régimen operacional del motor y las condiciones atmosféricas en las que opera la aeronave.

La metodología adoptada proviene del informe técnico elaborado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, documento que consolida procedimientos estandarizados para la elaboración de inventarios de emisiones a nivel nacional. Este marco metodológico integra datos operacionales reales de vuelo con factores de emisión certificados por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), permitiendo obtener estimaciones cuantitativas de contaminantes atmosféricos.

El enfoque seleccionado corresponde al nivel de mayor detalle disponible dentro de la jerarquía metodológica propuesta por la EEA, específicamente aquél que utiliza información de trayectorias de vuelo con datos de origen y destino. Esta elección permite una segregación precisa entre vuelos nacionales e internacionales, además de facilitar la identificación de patrones espaciales y temporales en la generación de emisiones. Las emisiones del transporte aéreo se estiman mediante una metodología basada en el consumo de combustible por ruta, consistente con los lineamientos de la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) y el esquema CORSIA [43,45,46]. La estimación distingue dos componentes principales:

- **Emisiones del ciclo de aterrizaje y despegue (*LTO, Landing and Take-Off*):** Comprenden las operaciones por debajo de 3.000 pies (914 m) de altitud.
- **Emisiones de la fase de crucero:** Correspondientes al vuelo por encima de dicha altitud [45,46].

### **2.3.1. Emisiones del Ciclo LTO**

Como se mencionó anteriormente, El ciclo LTO comprende todas las operaciones que se desarrollan por debajo de los 3,000 pies (aproximadamente 1,000 metros). Este ciclo se descompone en cuatro fases operacionales estandarizadas por la ICAO:



aproximación (*approach*, 4.0 minutos), rodaje de entrada (*taxi-in*), rodaje de salida (*taxi-out*, 26.0 minutos en total para taxi) y despegue/ascenso (*take-off/climb-out*, 0.7 + 2.2 minutos) [45,46].

- **Rodaje (*Taxiing*):** Comprende el movimiento terrestre de la aeronave, abarcando el trayecto desde la plataforma de estacionamiento hasta la cabecera de la pista previo al vuelo, así como el desplazamiento de retorno a la terminal una vez finalizado el aterrizaje. En esta etapa, los propulsores funcionan a baja potencia o en régimen de ralentí.
- **Despegue (*Take-Off*):** Representa el momento de mayor exigencia de empuje para los motores. La aeronave experimenta una aceleración continua sobre la pista hasta lograr la velocidad de rotación que le permite iniciar el vuelo. Se distingue por registrar la tasa máxima de consumo de combustible en el lapso operativo más breve.
- **Ascenso Inicial (*Initial Climb*):** Etapa que sigue de manera inmediata al despegue, en la cual el avión gana altitud utilizando un nivel de potencia elevado hasta rebasar la altitud de transición predefinida. Durante este período, los propulsores operan a regímenes muy próximos a su capacidad máxima.
- **Aproximación (*Approach*):** Maniobra de descenso que antecede al aterrizaje. La aeronave disminuye su altura de forma gradual mientras establece la alineación correcta con la pista de destino. El régimen de los motores fluctúa constantemente, realizándose ajustes continuos para asegurar la trayectoria y velocidad de la senda de descenso.

Las emisiones para cada fase se pueden calcular de la siguiente manera:

$$E_{LTO}(p, f) = TIM(f) \times FF(f) \times EI(p, f) \times N_{operaciones} \quad (2.15)$$

Donde  $TIM(f)$  es el tiempo en modo para la fase  $f$  (minutos),  $FF(f)$  es el flujo de combustible durante la fase  $f$  (kg/s),  $EI(p, f)$  es el índice de emisión del contaminante  $p$  en la fase  $f$  (g/kg combustible), y  $N_{operaciones}$  es el número de operaciones LTO (un ciclo LTO comprende un aterrizaje y un despegue). Los índices de emisión por motor y fase operacional se obtienen de la guía EMEP/EEA 2023 y de la base de datos de emisiones de motores de aviación de la ICAO (*ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*) [45,46].

La carga de emisiones atribuible a cada operación individual dentro de la ventana LTO se calculó mediante el siguiente modelo:

$$E_{LTO,x,i} = FE_{x,j} \cdot f_{man} \quad (2.16)$$

Donde:

- $E_{LTO,x,i}$  representa la masa emitida del contaminante  $x$  durante el registro de vuelo  $i$ .
- $FE_{x,j}$  corresponde al factor de emisión nominal del contaminante  $x$  estipulado para el modelo de motor  $j$ .
- $f_{man}$  es el coeficiente de fraccionamiento según el tipo de maniobra.

El coeficiente de fraccionamiento ( $f_{man}$ ) se define empíricamente con un valor de 0,3 para las maniobras de llegada (A) y 0,7 para las de salida (D). Esta ponderación asimétrica captura el desbalance energético de las operaciones, dado que las fases de despegue y ascenso inicial demandan niveles de empuje y consumo sustancialmente mayores que los requeridos durante el descenso y aterrizaje, lo cual tiene mucho sentido.

La agregación de la carga ambiental anual para el ciclo LTO se obtiene totalizando los eventos:

$$E_{LTO,x,total} = \sum_{i=1}^N E_{LTO,x,i} \quad (2.17)$$

Siendo  $N$  el universo total de maniobras contabilizadas en el periodo de estudio.

### 2.3.2. Emisiones de la Fase de CCD

Las fases CCD abarcan las operaciones que se desarrollan por encima de los 3,000 pies y constituyen la mayor parte del tiempo de vuelo.

- **Ascenso Continuo (*Climb*):** Posterior al ascenso inicial, la aeronave continúa ganando altitud hasta alcanzar el nivel de crucero óptimo. Los motores operan con alta demanda de potencia, aunque inferior a la fase de despegue.
- **Crucero (*Cruise*):** Representa la fase de mayor duración en cualquier vuelo. La aeronave mantiene altitud y velocidad relativamente constantes, mientras los

motores operan en régimen de crucero optimizado para eficiencia de combustible. A pesar del régimen relativamente bajo, la duración extendida de esta fase resulta en consumos totales de combustible significativos.

- **Descenso (*Descent*):** La aeronave reduce gradualmente su altitud en preparación para la aproximación final. Los motores operan en régimen reducido, frecuentemente cerca del ralentí, aprovechando la energía potencial gravitacional para el descenso.

Las emisiones generadas durante las fases CCD ocurren en la troposfera superior y baja estratosfera, es decir en la zona conocida como tropopausa, donde su permanencia y efectos climáticos difieren de aquellas emitidas a nivel del suelo. Estas emisiones se estiman a partir del consumo de combustible en vuelo, siguiendo la metodología de la guía EMEP/EEA de la Unión Europea y la Calculadora de Emisiones de Carbono de la ICAO (ICEC) [46]. El consumo de combustible por vuelo se determina en función de la distancia del gran círculo (GCD, *Great Circle Distance*) entre los aeropuertos de origen y destino, el tipo de aeronave equivalente, el factor de carga de pasajeros y el factor de pasajeros a carga [46]:

$$FC_{\text{crucero}} = f(GCD, \text{tipo\_aeronave}) \times PLF \times PCF \quad (2.18)$$

Donde  $FC_{\text{crucero}}$  es el consumo de combustible atribuible a pasajeros durante la fase de crucero (kg),  $f(GCD, \text{tipo\_aeronave})$  es la función de consumo específica por tipo de aeronave y distancia,  $PLF$  es el factor de carga de pasajeros (*passenger load factor*) y  $PCF$  es el factor de pasajeros a carga (*passenger-to-cargo factor*) [46].

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  se obtienen multiplicando el consumo de combustible por el factor de emisión estándar para queroseno de aviación:

$$E_{\text{CO}_2} = FC_{\text{total}} \times 3,16 \left[ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg combustible}} \right] \quad (2.19)$$

Para los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), las emisiones de crucero se estiman mediante el método *Boeing Fuel Flow Method 2* (BFFM2), que correlaciona el índice de emisión de  $\text{NO}_x$  con el flujo de combustible, ajustado por las condiciones atmosféricas de altitud de crucero (temperatura, presión, humedad) [21].

## Determinación de Distancias de Vuelo

Para proyectar las emisiones generadas en las fases de altitud (ascenso continuo, crucero y descenso), resulta esencial establecer en primera instancia la longitud física del trayecto. Bajo esta premisa, es que se aplicó la formulación trigonométrica de Haversine para encontrar la distancia del gran círculo (ortodrómica) que conecta los terminales:

$$d_{km} = 2r \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (2.20)$$

Donde:

- $d_{km}$  es la distancia terrestre medida en kilómetros.
- $r$  es el radio ecuatorial medio del planeta, equivalente a 6.371 km.
- $\phi_1, \phi_2$  representan las latitudes de origen y destino (expresadas en radianes).
- $\lambda_1, \lambda_2$  representan las longitudes de origen y destino (expresadas en radianes).

Posteriormente, las distancias métricas fueron convertidas a la unidad estándar de la industria, la milla náutica (NM), dividiendo el valor por 1,852 ( $d_{NM} = d_{km}/1,852$ ). Considerando que la base de datos registra cada evento como una media maniobra, el trayecto de crucero asignado a cada línea de datos equivale a la mitad de la distancia total calculada entre los aeropuertos.

## Factores de Emisión Parametrizados por Distancia

A diferencia de las operaciones en tierra, los factores para las fases CCD se dimensionan en función de la masa de contaminante expulsada por cada milla náutica volada. Estos valores integran el comportamiento aerodinámico de la nave en crucero, el rendimiento del motor a bajas temperaturas y la geometría de las trayectorias de elevación y caída. La base de datos de la EEA clasifica estos factores en saltos discretos de longitud (por ejemplo, 200 NM, 500 NM o 1000 NM), reconociendo que el consumo marginal disminuye en rutas más extensas. Para calcular las emisiones en trayectos de longitud intermedia, se implementó una rutina de interpolación lineal basada en los rangos tabulados más próximos.

## Modelación Matemática para Fases CCD

La cuantificación de contaminantes en altura para cada media maniobra se rige por la siguiente ecuación:

$$E_{\text{CCD},x,i} = FE_{\text{CCD},x,j}(d) \cdot d_i \quad (2.21)$$

Donde:

- $E_{\text{CCD},x,i}$  equivale a las emisiones del contaminante  $x$  generadas en las fases CCD del evento  $i$ .
- $FE_{\text{CCD},x,j}(d)$  es el factor de emisión por milla náutica del contaminante  $x$ , ajustado al motor  $j$  y evaluado a la distancia interpolada  $d$ .
- $d_i$  corresponde a la porción de distancia efectiva volada por la aeronave en el registro  $i$ , medida en millas náuticas.

Finalmente, el consolidado de emisiones de vuelo en ruta se computa sumando las contribuciones individuales:

$$E_{\text{CCD},x,\text{total}} = \sum_{i=1}^N E_{\text{CCD},x,i} \quad (2.22)$$

### 2.3.3. Fuentes de Datos para Chile

Los datos de actividad aérea para Chile provienen principalmente de dos fuentes, por una lado tenemos la Junta de Aeronáutica Civil (JAC), organismo dependiente del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, que publica informes estadísticos mensuales del tráfico aéreo comercial del país [20,67] y por el otro lado también se extrajo información de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Estos informes proporcionan el número de pasajeros transportados, la frecuencia de vuelos y las rutas operadas, tanto para el segmento doméstico como internacional. Con información obtenida de estas fuentes se generan las Tablas 2.6 y 2.7.

La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) complementa esta información con datos operacionales de los aeropuertos nacionales, incluyendo el número de operaciones LTO por aeropuerto y los tiempos de rodaje reales [19,20]. Datos adicionales sobre tipos de aeronave y consumo de combustible se obtienen de la guía metodológica

Tabla 2.6: Principales aeropuertos de Chile: número de operaciones anuales y rutas domésticas frecuentes.

| <b>Aeropuerto</b>           | <b>Operaciones Anuales</b> | <b>Rutas Domésticas Frecuentes</b> |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Arturo Merino Benítez (SCL) | ~ 150.000                  | Antofagasta, Calama, Iquique       |
| Andrés Sabella (ANF)        | ~ 20.000                   | Santiago, La Serena, Iquique       |
| El Loa (CJC)                | ~ 18.000                   | Santiago, Antofagasta, La Serena   |
| Diego Aracena (IQQ)         | ~ 15.000                   | Santiago, Antofagasta, Arica       |
| Carriel Sur (CCP)           | ~ 12.000                   | Santiago, Antofagasta, Calama      |

*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Junta de Aeronáutica Civil (JAC) y Estadísticas de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).*

Tabla 2.7: Principales aeropuertos de Chile: rutas internacionales más frecuentes.

| <b>Aeropuerto</b>           | <b>Rutas Internacionales Frecuentes</b> |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Arturo Merino Benítez (SCL) | Buenos Aires, Lima, São Paulo           |
| Andrés Sabella (ANF)        | Lima (Estacional)                       |
| El Loa (CJC)                | Lima (Estacional)                       |
| Diego Aracena (IQQ)         | La Paz, Santa Cruz                      |
| Carriel Sur (CCP)           | -                                       |

*Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Junta de Aeronáutica Civil (JAC) y Estadísticas de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).*

EMEP/EEA y de las bases de datos de la ICAO, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) y los informes de sostenibilidad de las aerolíneas que operan en Chile.

Por lo tanto, la estructuración de la metodología exigió la consolidación y cruce de diversas bases de datos especializadas:

- **Registros de operaciones aéreas:** Se utilizó la información documental mensual provista por la Junta de Aeronáutica Civil (JAC). Esta base detalla los códigos OACI de los terminales de origen y destino, la longitud del trayecto, la aerolínea, el modelo de aeronave, el sello temporal del vuelo (fecha y hora), así como la categoría de la maniobra, clasificada según la codificación ADW.
- **Especificaciones técnicas de la flota:** Se recurrió a los repositorios de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para obtener los parámetros certificados de cada combinación de aeronave y planta motriz. Esto abarca los tiempos estándar de cada segmento del ciclo LTO, las tasas de consumo de combustible, la configuración de los motores y los índices de emisión validados para distintos contaminantes.
- **Información geoespacial:** Se construyó un catastro georreferenciado que asocia cada identificador OACI con sus coordenadas globales (latitud y longitud), ciudad y país. Esta herramienta es fundamental para el cálculo riguroso de las trayectorias ortodrómicas entre terminales.

### **Arquitectura de la Base de Datos**

El procesamiento computacional abarcó un volumen superior al millón de registros de vuelos individuales durante el horizonte de estudio. Para gestionar esta magnitud de información, se diseñó una arquitectura de bases de datos relacionales capaz de acoplar la dinámica de cada vuelo con sus respectivos atributos técnicos. A nivel de programación, cada operación reportada por la JAC se encadenó lógicamente con la tipología de la aeronave, el modelo de motor certificado, los índices de emisión correspondientes a dicho propulsor y la posición geográfica exacta de los puntos de despegue y aterrizaje.

### **Tratamiento de Maniobras ADW**

El sistema de la JAC clasifica las fases del vuelo mediante identificadores alfabéticos: 'A' para maniobras de aproximación/aterrizaje (*Arrival*), 'D' para salidas/despegues

(*Departure*) y 'W' para tránsitos o sobrevuelos (*Way-point*). El marco metodológico establece que un ciclo LTO íntegro se compone de dos registros complementarios (A+D) que compartan el mismo origen, destino, aeronave y fecha.

Esta segmentación operativa es clave, ya que permite aislar y cuantificar las emisiones de cada "media maniobra", distribuyendo equitativamente la huella ambiental y el gasto de combustible entre los aeródromos de inicio y término del trayecto.

### **Factores de Emisión**

El pilar de la cuantificación ambiental recae en los factores de emisión, los cuales fueron extraídos de la herramienta "*Master Emissions Calculator*" de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). Estos índices reflejan la masa de contaminante liberada durante un ciclo LTO completo, parametrizada para cada dupla de fuselaje y motor.

El inventario de emisiones cuantificadas en masa (kilogramos) comprende:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrocarburos no quemados (HC)
- Dióxido de azufre (SO<sub>x</sub>)
- Material particulado total (PM)
- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O)

Es imperativo destacar que el factor asociado al CO<sub>2</sub> obedece a una proporción estequiométrica directa y constante respecto al volumen de queroseno de aviación consumido (3,15 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de combustible). Por el contrario, la generación del resto de los contaminantes fluctúa significativamente dependiendo de la eficiencia termodinámica del motor y de su régimen de empuje.

## **2.4. Estimación de Emisiones del Transporte Marítimo**

La estimación de los niveles de actividad y la consecuente emisión de gases contaminantes en el sector marítimo depende de un conjunto de variables operacionales y



tecnológicas fundamentales. Entre los principales factores que inciden en este cálculo se encuentran:

- Clasificación del motor
- Régimen de velocidad del motor
- Naturaleza del tipo de combustible
- Categoría de la embarcación
- Fase u operación de navegación

**Clasificación del motor:** Las naves marinas suelen ser energéticamente autónomas, empleando distintos sistemas mecánicos para cubrir sus requerimientos de propulsión y operaciones a bordo. El *motor principal* (ME, por sus siglas en inglés) se destina primordialmente a generar el empuje y desplazamiento del navío. Por su parte, la demanda eléctrica de la embarcación es cubierta por los *motores auxiliares* (AE), los cuales consumen derivados del petróleo. Adicionalmente a esta configuración estándar, ciertas naves incorporan tecnologías como turbinas de vapor (ST), turbinas de gas (GT) o generadores diésel de emergencia, según sus requerimientos específicos.

**Régimen de velocidad del motor:** Los propulsores navales se categorizan en función de su régimen de giro en motores de alta velocidad (HSD, *High Speed Diesel*), media velocidad (MSD, *Medium Speed Diesel*) y baja velocidad (SSD, *Slow Speed Diesel*). Típicamente, los motores principales (ME) operan en los rangos MSD y SSD, garantizando mayor eficiencia para la propulsión directa, mientras que los equipos auxiliares (AE) funcionan preferentemente a velocidades HSD y MSD. Cabe destacar que las turbinas de vapor (ST) presentan eficiencias térmicas comparativamente reducidas, motivo por el cual están experimentando un reemplazo progresivo por motores diésel más eficientes.

**Naturaleza del tipo de combustible:** El sector marítimo emplea una amplia gama de combustibles, los cuales se clasifican fundamentalmente según su grado de viscosidad. El espectro abarca desde los destilados marinos (MD) hasta los combustibles más densos y pesados, como el fueloil residual (RO) o *Heavy Fuel Oil* (HFO).

- El **RO (Fueloil Residual)** domina el consumo naval, siendo el insumo estándar y fundamental para el funcionamiento operativo de la mayoría de los motores diésel principales.
- Dentro de la categoría de los destilados (**MD**), destacan el *Marine Gas Oil* (MGO) y el *Marine Diesel Oil* (MDO). El MGO es un hidrocarburo líquido de mayor pureza empleado comúnmente en motores auxiliares. Por su parte, el MDO, que resulta de una mezcla técnica entre MGO y RO, es de uso generalizado para alimentar motores auxiliares diésel de régimen alto y medio.
- **Combustibles alternativos:** Con el propósito de mitigar el impacto ambiental derivado de los combustibles fósiles, la industria explora nuevas alternativas energéticas. Aunque los biocombustibles enfrentan retos respecto a la escalabilidad de su producción y sostenibilidad, vectores energéticos como el amoníaco, el metanol y el hidrógeno se perfilan como soluciones viables y necesarias para la descarbonización del sector. Como evidencia de esta transición, compañías navieras líderes como Maersk han proyectado la integración de buques propulsados por metanol a sus flotas a partir del año 2024.

**Categoría de la embarcación:** La tipología estructural y técnica de las naves está condicionada directamente por la naturaleza de la carga transportada y el tipo de tráfico que realizan (navegación de cabotaje o rutas internacionales tipo *bunker*). La investigación llevada a cabo amplía su alcance analítico al cálculo de la actividad y emisiones en embarcaciones de carácter comercial, es decir, aquellas dedicadas primordialmente al transporte logístico de mercancías o pasajeros. En la Tabla 2.8, se detallan las distintas categorías navales evaluadas junto a sus atributos y características operacionales específicas.

Los parámetros operacionales detallados en la tabla anterior, tales como la velocidad promedio de crucero, la capacidad y factor de ocupación de carga, los regímenes de los motores principal y auxiliar, y el tipo de combustible empleado, se fundamentan en diversas fuentes tanto nacionales como internacionales, incluyendo la conocida y muy utilizada tipología desarrollada por el reporte “*UK Ship Emissions Inventory*” (ENTEC UK, 2010). Por otro lado, los datos correspondientes a la potencia instalada de dichos motores fueron extraídos de las guías EMEP/EEA y también de la investigación de Villegas, en su trabajo titulado “*Análisis de los factores de emisión y consumo energético de los modos del sector transporte en el periodo 2020-2050*”.

Tabla 2.8: Datos de los tipos de embarcación analizados, información de acuerdo a “UK Ship Emissions Inventory” de ENTEC UK.

| Tipo     | Tipo ENTEC UK  | Nudos | Capac [Ton] | FO   | ET_ME | ET_AE | FT_ME | FT_AE | ME [kW] | AE [kW] |
|----------|----------------|-------|-------------|------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| TLE      | Tanker         | 14,3  | 15000       | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 6543    | 2290,05 |
| GRL      | General Cargo  | 13,2  | 80000       | 30 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 2555    | 945,35  |
| FRI      | General Cargo  | 13,2  | 50000       | 40 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 2555    | 945,35  |
| ROF      | Ro-Ro Cargo    | 18    | 10000       | 90 % | MSD   | MSD   | RO    | RO    | 4194    | 1425,96 |
| PAS/PASC | Passenger      | 20,6  | 5000        | 90 % | MSD   | MSD   | MD    | MD    | 10196   | 4588,2  |
| GAS      | Tanker         | 14,3  | 100000      | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 6543    | 2290,05 |
| GRA      | Bulk Carrier   | 14,1  | 100000      | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 4397    | 1011,31 |
| PTR      | Passenger      | 14,3  | 10000       | 90 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 10196   | 4588,2  |
| PES      | Fishing        | 13    | 5000        | 80 % | MSD   | MSD   | MD    | MD    | 734     | 418,38  |
| PET      | Tanker         | 14,3  | 80000       | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 6543    | 2290,05 |
| PTC      | Container Ship | 21,2  | 10000       | 40 % | MSD   | MSD   | RO    | RO    | 14871   | 4163,88 |
| QUI      | Tanker         | 14,3  | 25000       | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 6543    | 2290,05 |
| WEL      | Fishing        | 13    | 10000       | 90 % | MSD   | MSD   | MD    | MD    | 734     | 418,38  |
| TEC1     | General Cargo  | 13,2  | 100000      | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 2555    | 945,35  |
| TEC2     | General Cargo  | 13,2  | 100000      | 50 % | SSD   | MSD   | RO    | MD    | 2555    | 945,35  |
| Otro     | Otro           | 12,8  | 0           | 0 %  | MSD   | MSD   | MD    | MD    | 2469    | 765,39  |

## Fases de Operación

Al igual que en el sector aeronáutico, la navegación marítima se divide en distintas etapas operacionales como se mencionó con anterioridad. Cada fase se caracteriza por un perfil de emisiones particular, directamente asociado al nivel de carga y exigencia de los motores para llevar a cabo sus funciones. Estas fases se clasifican en:

- **Crucero (*Cruise*):** Comprende los movimientos de tránsito en mar abierto entre el puerto de origen y el de destino. Durante este trayecto, el motor principal (ME) opera típicamente al 80 % de su capacidad máxima, mientras que la contribución a las emisiones por parte de los motores auxiliares (AE) se considera marginal en comparación.
- **Maniobra (*Maneuvering*):** Corresponde a las operaciones de aproximación, ingreso y salida de los recintos portuarios. Aunque la distancia y duración de estas acciones dependen intrínsecamente de la disposición geométrica de cada terminal y de los requerimientos de la nave, para efectos de modelación se asume un tiempo medio estimado de una hora. Durante esta fase, tanto el ME como el AE se encuentran activos para garantizar el control de la nave.
- **Puerto (*Hoteling*):** Durante el tiempo de atraque y estadía en el terminal, el

motor principal permanece apagado. La demanda energética de la embarcación (operaciones a bordo, iluminación, climatización) es cubierta exclusivamente por los motores auxiliares, los cuales operan en torno al 50 % de su carga nominal.

Adicionalmente se tiene la fase de 'fondeo' o 'fondeo a la gira', la cual consiste en la etapa en que la embarcación termina su fase de crucero y está esperando antes de comenzar su etapa de maniobra. Esta fase no se modela en las guías internacionales EMEP/EEA de la Unión Europea y lo que ellos recomiendan es agregar un factor y aumentar las emisiones totales en un 10 % aproximadamente, pero en esta investigación también se ha incluido esta fase y se ha cuantificado siguiendo los lineamientos y metodologías de estudios realizados en territorio nacional, como el estudio de Ambiosis titulado 'Consultoría Para la Estimación de las Emisiones Producidas por las Embarcaciones Marítimas en la Bahía de Quintero' realizado por encargo de la subsecretaría del medio ambiente. Esto es una mejora sustancial y aumenta el nivel de dificultad y principalmente la cantidad y volumen de datos que hay que manejar, lo cual por consiguiente permite realizar una estimación más precisa de las emisiones asociadas.

#### **2.4.1. Enfoque Metodológico Basado en AIS**

La estimación de emisiones del transporte marítimo emplea un enfoque *bottom-up* basado en datos del Sistema de Identificación Automática (AIS, *Automatic Identification System*) [9, 114]. El AIS es un sistema de seguimiento de embarcaciones que transmite automáticamente una variedad de información de la embarcación, incluyendo información sobre la posición geográfica, velocidad sobre el fondo, rumbo, número de identificación MMSI (*Maritime Mobile Service Identity*), y otros parámetros operacionales de las naves [114]. En esta investigación y en función de la disponibilidad de la información, se emplearon los datos AIS los cuales se vinculan con las especificaciones técnicas estáticas de cada embarcación, las cuales son obtenidas de la base de datos IHS Markit/Lloyd's Register o equivalentes, que incluyen el número IMO, tipo de buque, tonelaje de peso muerto (DWT), potencia del motor principal (kW), velocidad de diseño y año de construcción [113, 114].

La metodología se alinea con la empleada en el Cuarto Estudio de GEI de la IMO (2020) [57] y en modelos internacionales reconocidos como STEAM (*Ship Traffic Emission Assessment Model*) y SEIM (*Shipping Emission Inventory Model*) [66, 114]. Las emisiones se calculan a nivel de embarcación individual y para cada señal AIS, integrando, en función de la disponibilidad de información, la velocidad real del buque

con sus parámetros técnicos y factores de emisión específicos por tipo de motor y combustible.

### 2.4.2. Ecuaciones de Cálculo

Las emisiones instantáneas de un contaminante  $p$  para una embarcación  $i$  entre dos señales AIS consecutivas se calculan considerando las contribuciones del motor principal (ME), motores auxiliares (AE) y calderas (BO) [83, 114]:

$$E_{i,p} = E_{ME,i,p} + E_{AE,i,p} + E_{BO,i,p} \quad (2.23)$$

Para el motor principal, la emisión entre dos señales AIS (intervalo  $\Delta t$ ) se calcula como:

$$E_{ME,i,p} = P_{ME,i} \cdot LF_{ME,i} \cdot EF_{ME,p} \cdot \Delta t \quad (2.24)$$

Donde  $P_{ME,i}$  es la potencia nominal del motor principal (kW),  $LF_{ME,i}$  es el factor de carga del motor y  $EF_{ME,p}$  es el factor de emisión del contaminante  $p$  para el motor principal (g/kWh). El factor de carga del motor principal se puede estimar a partir de la relación cúbica entre la velocidad real del buque (derivada de los datos AIS) y su velocidad de diseño [83, 114]:

$$LF_{ME} = \left( \frac{V_{\text{real}}}{V_{\text{diseño}}} \right)^3 \quad (2.25)$$

Esta relación se fundamenta en la ley del cubo (*propeller law*), que establece que la potencia requerida para la propulsión naval es proporcional al cubo de la velocidad del buque. Para los motores auxiliares, cuya operación depende del modo operacional del buque (navegación, maniobra, atraque), se emplean estimaciones de carga basadas en las recomendaciones del Cuarto Estudio de GEI de la IMO [57] y de la metodología ICCT [83].

### 2.4.3. Bases de Datos del Modo Marítimo

El desarrollo de esta investigación es posible mediante el procesamiento de una variedad enorme de bases de datos tanto nacionales como internacionales, entre las cuales se destaca la información suministrada mediante ley de transparencia por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR),

institución encargada de la fiscalización de la actividad naviera en aguas jurisdiccionales chilenas y también responsable de la elaboración del “*Boletín Estadístico Anual*”, documento que consolida las cifras de importación y exportación del país el cual también fue utilizado. También se cuenta con una base de datos de elaboración propia y tiene como propósito complementar la información oficial, geo-referenciando y asignando el país correspondiente a cada uno de los puertos extranjeros registrados en la base de DIRECTEMAR.

### Manejo de la información

En este apartado se describen los procedimientos aplicados sistemáticamente para la depuración y estructuración de los datos operativos, pasos previos indispensables para la implementación de la metodología de estimación de emisiones en el sector marítimo. El flujo de procesamiento se detalla a continuación:

- **Filtrado por puerto de destino:** Se realiza una depuración inicial de la base de datos, excluyendo todos aquellos registros de recaladas que carecen de información explícita sobre su puerto de destino, garantizando la consistencia del análisis espacial.
- **Identificación georreferenciada del puerto:** Para establecer el país de pertenencia de cada puerto de destino, se cruza la información de las recaladas con bases de datos especializadas y plataformas de rastreo naval como *MarineTraffic* y *World Port Source*.
- **Clasificación Nacional/Internacional:** Las operaciones registradas se segregan en dos categorías principales según su alcance geográfico: tráfico marítimo nacional (cabotaje) y tráfico internacional (*bunker*).
- **Tipificación de la flota:** Las embarcaciones se agrupan en categorías estandarizadas tomando como referencia la taxonomía propuesta por *ENTEC UK Limited* (2010). Este paso requiere la asignación de parámetros técnicos específicos para cada clase de navío, incluyendo la potencia nominal de los motores principal y auxiliar, los regímenes de operación, el tipo de combustible consumido, así como la capacidad de diseño y los respectivos factores de carga (ocupación).
- **Consolidación de rutas internacionales:** Para simplificar la modelación del tráfico internacional, se definen puertos auxiliares (nodos) de origen y destino.

La metodología consiste en agrupar todas las recaladas dirigidas hacia un país específico y asignarlas a su puerto con mayor volumen de participación. De manera excepcional, dada su vasta extensión territorial, los destinos hacia Argentina, Brasil, Perú y Estados Unidos se sectorizan en macro-zonas portuarias.

La cuantificación de la actividad del transporte marítimo se fundamenta en la interacción de tres variables críticas: por una lado se tiene la frecuencia de recaladas, luego las distancias navegadas por ruta y el tonelaje efectivo transportado. El desarrollo algorítmico para la obtención de estos parámetros se expone a continuación.

### **Cálculo de cantidad de recaladas**

A partir de los registros depurados de DIRECTEMAR, se realiza una agregación de los datos segmentando por categoría técnica de embarcación. Este proceso permite contabilizar la frecuencia exacta de viajes (recaladas) que comparten un mismo par origen-destino.

### **Cálculo de distancias recorridas**

A diferencia de las trayectorias aéreas, la estimación de rutas navales no puede resolverse asumiendo un desplazamiento en línea recta (ortodrómica) entre puertos, ya que esto implicaría trayectorias inviables sobre masas terrestres o ignoraría los patrones de navegación costera. Para obtener representaciones fidednas de las trayectorias marítimas, se utiliza la herramienta de planificación de rutas de la plataforma *MarineTraffic*. Este sistema determina las distancias de navegación basándose en datos satelitales empíricos (Sistemas de Identificación Automática, AIS) acumulados por la flota mundial.

En el caso particular de aquellas recaladas de cabotaje donde el registro indica el mismo puerto de origen y destino, se asigna convencionalmente una distancia operativa de 1 milla náutica en régimen de crucero.

Para el tráfico nacional, la plataforma *MarineTraffic* permite resolver exitosamente la distancia de aproximadamente el 90 % de los registros. Para estimar la distancia del remanente de rutas menores o de baja frecuencia, se aplica matemáticamente la fórmula de Haversine sobre las coordenadas geográficas de los puertos, tal como se define a continuación:

$$D = 2r \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (2.26)$$

Donde  $D$  representa la distancia calculada en kilómetros entre los dos puntos,  $r$  es el radio medio del planeta Tierra (asumido como 6.371 km en este estudio),  $\phi$  denota la latitud y  $\lambda$  la longitud de los puertos involucrados.

### **Cálculo de cantidad de toneladas transportadas**

El flujo de masa efectiva movilizada se determina multiplicando la capacidad nominal de diseño de cada tipología de buque por su factor de carga histórico o proyectado, según la siguiente expresión:

$$T_{j,k} = O_{j,k} \cdot C_j \quad (2.27)$$

Donde  $T_{j,k}$  equivale a la masa transportada (en toneladas) por la categoría de nave  $j$  durante el periodo  $k$ ;  $O_{j,k}$  es el factor de ocupación medio asociado a la embarcación  $j$  en el año  $k$ ; y  $C_j$  representa la capacidad máxima de diseño (tonelaje) del buque tipo  $j$ .

### **Cálculo de distancia promedio recorrida**

Una vez determinada la frecuencia de operación de las rutas y sus respectivas longitudes físicas, es posible establecer el recorrido medio ponderado para cada clase de buque evaluado:

$$D_{\text{prom},j,k} = \frac{\sum (N_{i,j,k} \cdot D_i)}{\sum N_{j,k}} \quad (2.28)$$

Donde  $D_{\text{prom},j,k}$  es la distancia media navegada por la clase de buque  $j$  en el año  $k$ ;  $N_{i,j,k}$  indica el número de viajes ejecutados en la ruta  $i$  por el buque tipo  $j$  en el periodo  $k$ ;  $D_i$  es la longitud en kilómetros de la ruta  $i$ ; y  $N_{j,k}$  corresponde a la suma total de viajes realizados por el buque tipo  $j$  en el año  $k$ .



### Cálculo de TKM (Toneladas-Kilómetro)

El indicador TKM define la demanda agregada de transporte de carga, expresando el esfuerzo logístico en términos de masa desplazada sobre una distancia. Integrando las frecuencias operativas, la carga efectiva y los recorridos medios, la métrica se define como:

$$TKM_k = \sum_j TKM_{j,k} = \sum_j (N_{j,k} \cdot D_{\text{prom},j,k} \cdot T_{j,k}) \quad (2.29)$$

Donde  $TKM_k$  consolida el esfuerzo de transporte global del sector en el año  $k$ ;  $TKM_{j,k}$  representa la contribución específica de la categoría de nave  $j$ ;  $N_{j,k}$  denota la cantidad de recaladas del buque  $j$  en el año  $k$ ;  $D_{\text{prom},j,k}$  es el recorrido medio ponderado del navío tipo  $j$ ; y  $T_{j,k}$  es la carga efectiva transportada por la embarcación  $j$  en el periodo evaluado.

### Emisiones del Transporte Marítimo

Respecto a la estimación del inventario de emisiones portuarias y de navegación, estas se desarrollan siguiendo las directrices metodológicas establecidas por la Agencia Europea de Medio Ambiente en el manual “*EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*”. Para complementar los parámetros técnicos y factores de emisión específicos de la flota comercial, se integraron también lineamientos del modelo sueco *Swedish Methodology for Environmental Data* (SMED). Este referente proporciona factores de emisión calibrados para buques con un arqueo superior a 100 GRT (Toneladas de Registro Bruto, unidad volumétrica equivalente a 100 pies cúbicos, actualmente considerada obsoleta pero aún presente en bases históricas).

En virtud de lo anterior, la cuantificación de los contaminantes se ejecuta de manera diferenciada según la dinámica operacional de la embarcación, calculando separadamente la fracción de emisiones generadas durante el tránsito en altamar y aquellas emitidas durante las fases de maniobra y estadía en los recintos portuarios.

#### 2.4.4. Factores de Emisión Marítimos

Los factores de emisión para el transporte marítimo se seleccionan según el tipo de motor (dos tiempos de baja velocidad, cuatro tiempos de media velocidad, turbinas de gas), el tipo de combustible utilizado (HFO — *Heavy Fuel Oil*, MDO — *Marine*

*Diesel Oil*, MGO — *Marine Gas Oil*, LNG) y el nivel de regulación internacional aplicable (Tier I, Tier II, Tier III de la IMO para NO<sub>x</sub>, regulación MARPOL para SO<sub>x</sub>) [57,83,114]. Los valores típicos de factores de emisión para motores principales, expresados en g/kWh, incluyen [83]:

- CO<sub>2</sub>: 620–640 g/kWh (motor dos tiempos, HFO)
- NO<sub>x</sub>: 10–18 g/kWh (Tier I); 7–14.4 g/kWh (Tier II); 2–3.4 g/kWh (Tier III)
- SO<sub>x</sub>: dependiente del contenido de azufre del combustible (0.5 % global desde 2020)
- PM: 0.3–1.5 g/kWh según tipo de combustible
- CO: 0.5–0.6 g/kWh

Entonces, según lo descrito los Factores de Emisión (FE) asociados a las embarcaciones están condicionados por tres variables fundamentales: en primer lugar está el tipo de motorización instalada, luego la naturaleza del combustible consumido y finalmente la fase de operación en la que se encuentra la embarcación. Tomando en consideración estos parámetros, la metodología adoptada se fundamenta en el reporte “*Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors*” y la guía de la Unión Europea EMEP/EEA. Estos documentos de referencia proporcionan tabulaciones detalladas de emisiones para diversos gases contaminantes, incorporando ajustes tecnológicos orientados a la mitigación ambiental.

Las tablas empleadas en esta investigación incluyen los factores correspondientes a tecnologías de reducción catalítica y optimización de combustión para NO<sub>x</sub>. Las estimaciones de los factores de emisión según la fase operativa se detallan en las siguientes tablas:

Una vez establecidos los Factores de Emisión (FE) específicos para cada tipología naval e integrados con sus respectivos niveles de actividad, se procede a la cuantificación total del inventario de gases contaminantes emitidos en cada fase de operación.

Para la etapa de navegación en altamar, el volumen de emisiones se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$E_{C,j} = \sum_i \left( N_{i,j} \cdot \frac{D_i}{v_j} \cdot [ME_j \cdot LFC_{ME} \cdot FE_{C,ET,FT(@ME_j)} + AE_j \cdot LFC_{AE} \cdot FE_{C,ET,FT(@AE_j)}] \right) \quad (2.30)$$

Tabla 2.9: Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo crucero.

| ET  | FT | FC  | NO <sub>x</sub> | CO     | NMVOC  | SO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> | PM  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O |
|-----|----|-----|-----------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|-----------------|------------------|
| SSD | MD | 185 | 16,9            | 0,5    | 0,3    | 1,5             | 0,003           | 0,2 | 588             | 0,006           | 0,031            |
| SSD | RO | 195 | 16,9916         | 0,4962 | 0,2974 | 9,0             | 0,00532         | 1,3 | 620             | 0,006           | 0,031            |
| MSD | MD | 205 | 13,0            | 1,1    | 0,2    | 1,6             | 0,005           | 0,2 | 652             | 0,004           | 0,031            |
| MSD | RO | 215 | 13,3            | 1,1    | 0,2    | 9,9             | 0,006           | 0,5 | 683             | 0,004           | 0,031            |
| HSD | MD | 205 | 12,0            | 1,1    | 0,2    | 1,6             | 0,003           | 0,2 | 652             | 0,004           | 0,031            |
| HSD | RO | 215 | 12,7            | 1,1    | 0,2    | 9,9             | 0,003           | 0,5 | 683             | 0,004           | 0,031            |

Tabla 2.10: Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo maniobra.

| ET  | FT | FC  | NO <sub>x</sub> | CO     | NMVOC  | SO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> | PM  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O |
|-----|----|-----|-----------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|-----------------|------------------|
| SSD | MD | 204 | 13,6            | 1,0    | 0,6    | 1,6             | 0,003           | 0,4 | 647             | 0,012           | 0,031            |
| SSD | RO | 215 | 13,5932         | 0,9924 | 0,5948 | 9,9             | 0,00532         | 2,6 | 682             | 0,012           | 0,031            |
| MSD | MD | 226 | 10,4            | 2,2    | 0,4    | 1,8             | 0,005           | 0,4 | 717             | 0,008           | 0,031            |
| MSD | RO | 237 | 10,6            | 2,2    | 0,4    | 10,9            | 0,006           | 1,0 | 752             | 0,008           | 0,031            |
| HSD | MD | 226 | 9,6             | 2,2    | 0,4    | 1,8             | 0,003           | 0,4 | 717             | 0,008           | 0,031            |
| HSD | RO | 237 | 10,1            | 2,2    | 0,4    | 10,9            | 0,003           | 1,0 | 752             | 0,008           | 0,031            |

Tabla 2.11: Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo puerto.

| ET  | FT | FC  | NO <sub>x</sub> | CO  | NMVOC | SO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> | PM  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O |
|-----|----|-----|-----------------|-----|-------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|-----------------|------------------|
| MSD | MD | 217 | 13,5            | 0,9 | 0,2   | 1,7             | 0,005           | 0,2 | 690             | 0,004           | 0,031            |
| MSD | RO | 227 | 14,0            | 0,9 | 0,2   | 10,4            | 0,006           | 0,5 | 722             | 0,004           | 0,031            |
| HSD | MD | 217 | 11,8            | 0,8 | 0,5   | 1,7             | 0,003           | 0,4 | 690             | 0,010           | 0,031            |
| HSD | RO | 227 | 12,0            | 1,3 | 0,5   | 10,4            | 0,003           | 0,5 | 722             | 0,010           | 0,031            |

Donde:

- $E_{C,j}$ : Emisiones totales asociadas al modo crucero para el tipo de embarcación  $j$ .
- $N_{i,j}$ : Número de recaladas en la ruta  $i$  efectuadas por la embarcación tipo  $j$ .
- $D_i$ : Longitud física de la ruta  $i$  (en kilómetros).
- $v_j$ : Velocidad media de desplazamiento de la embarcación tipo  $j$ .
- $ME_j$ : Potencia instalada del motor principal de la embarcación  $j$  (en kW).
- $LF_{C,ME}$ : Factor de carga operativo del motor principal durante el modo crucero.
- $FE_{C,ET,FT(@ME_j)}$ : Factor de emisión del motor principal en modo crucero, condicionado por su tipo tecnológico ( $ET$ ) y combustible ( $FT$ ).
- $AE_j$ : Potencia instalada de los motores auxiliares de la embarcación  $j$  (en kW).
- $LF_{C,AE}$ : Factor de carga operativo de los motores auxiliares durante el modo crucero.
- $FE_{C,ET,FT(@AE_j)}$ : Factor de emisión de los motores auxiliares en modo crucero, dependiente de su tecnología ( $ET$ ) y combustible ( $FT$ ).

De manera análoga, la estimación para las fases operacionales de aproximación y estadía (maniobra y puerto) se calcula aislando el factor tiempo y ajustando los regímenes de carga motriz:

$$E_{M/P,j} = \sum_i \left( N_{i,j} \cdot T_{\text{prom},M/P} \cdot \left[ ME_j \cdot LF_{M/P,ME} \cdot FE_{M/P,ET,FT(@ME_j)} + AE_j \cdot LF_{M/P,AE} \cdot FE_{M/P,ET,FT(@AE_j)} \right] \right) \quad (2.31)$$

Donde:

- $E_{M/P,j}$ : Emisiones generadas en la fase de maniobra o puerto para la embarcación tipo  $j$ .
- $T_{\text{prom},M/P}$ : Tiempo medio de permanencia de la nave en estado de maniobra o puerto.

- $LF_{M/P,ME}$ : Factor de carga del motor principal durante las operaciones de maniobra o puerto.
- $FE_{M/P,ET,FT(@ME_j)}$ : Factor de emisión del motor principal ajustado a la fase de maniobra o puerto.
- $LF_{M/P,AE}$ : Factor de carga del motor auxiliar durante las operaciones de maniobra o puerto.
- $FE_{M/P,ET,FT(@AE_j)}$ : Factor de emisión del motor auxiliar ajustado a la fase de maniobra o puerto.

El tiempo de permanencia en puerto asociado a cada tipo de embarcación se calcula empíricamente utilizando la base de datos de DIRECTEMAR, procesando la diferencia horaria entre la llegada y el zarpe registrado para viajes nacionales e internacionales. Para la duración de las maniobras portuarias, se asume un estándar metodológico respaldado por ENTEC UK, estableciendo un tiempo operativo promedio de 1 hora por ruta.

Posteriormente, la sumatoria de las emisiones sectoriales generadas por la totalidad de la flota naviera dentro de una fase operacional específica se define como:

$$E_{C/M/P} = \sum_j E_{C/M/P,j} \quad (2.32)$$

Donde  $E_{C/M/P}$  corresponde al volumen agregado de emisiones en modo crucero, maniobra o puerto para el parque naval completo, y  $E_{C/M/P,j}$  indica la contribución individual del subsegmento de embarcaciones tipo  $j$ .

Finalmente, el inventario total de gases contaminantes producidos por el sector marítimo ( $E_{total}$ ) se obtiene de la adición de los balances de masa computados para cada una de las fases de navegación:

$$E_{total} = E_C + E_M + E_P \quad (2.33)$$

Los datos AIS para las aguas jurisdiccionales chilenas se obtienen de proveedores comerciales de datos AIS globales, de MarineTraffic y/o de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR). Chile posee más de 25 puertos a lo largo de sus 6.435 km de costa, siendo los de mayor actividad San Antonio, Mejillones, Valparaíso, San Vicente, Quintero-Ventanas e Iquique [82]. La información sobre las características técnicas de las embarcaciones se complementa con la base

de datos del registro de buques de la Autoridad Marítima chilena y con bases de datos internacionales como IHS Markit como se mencionó con anterioridad. La identificación de los modos operacionales (navegación, maniobra, atraque, fondeo) se realiza mediante algoritmos de clasificación basados en la velocidad del buque y su proximidad a las zonas portuarias [110, 113].

## 2.5. Desagregación Espacial

La desagregación espacial de las emisiones estimadas para cada modo de transporte se realiza distribuyendo las emisiones nacionales totales sobre una grilla regular de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  de latitud y longitud, utilizando variables *proxy* específicas para cada modo [13, 38, 86, 90]. El principio fundamental es que la grilla no constituye un inventario independiente, sino que consiste en una representación espacial del inventario existente, es decir, el inventario define cuántas emisiones se producen, y la grilla indica dónde, de esta manera se pueden determinar y analizar cualitativa y también cuantitativamente los hotspots de emisiones [102]. La consistencia entre los totales nacionales del inventario y la suma de las emisiones en las celdas de la grilla se verifica de manera rigurosa y se integra en los modelos algorítmicos de cálculos desarrollados.

Comenzando con el transporte terrestre, la desagregación espacial se fundamenta en la red vial nacional, siguiendo la metodología de Osses *et al.* [86] y Álamos *et al.* [116]. La red vial de Chile se obtiene de la base de datos oficial de carreteras del país, proporcionada por la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN)<sup>1</sup>, complementada con información de OpenStreetMap (OSM):

- **Cartografía Oficial:** Información gubernamental provista por la Biblioteca del Congreso Nacional, que delimita las fronteras regionales y las áreas urbanas, en conjunto con los catastros oficiales mantenidos por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- **Plataforma *OpenStreetMap* (OSM):** Herramienta colaborativa de mapeo que enriquece y actualiza los registros del Estado, ofreciendo un levantamiento exhaustivo tanto del entorno urbano como rural. La naturaleza de *crowdsourcing* de OSM facilita la captura temprana de modificaciones recientes en la trama vial que podrían no estar aún reflejadas en los repositorios oficiales.

---

<sup>1</sup><https://www.bcn.cl/siit>

La red total comprende aproximadamente 77.800 km de carreteras rurales y urbanas [86]. Cada vía se clasifica en una jerarquía funcional que comprende autopistas (*freeways*), vías arteriales, vías colectoras y vías locales:

- **Autopistas (*Motorway*):** Rutas de alto estándar, generalmente bajo régimen de concesión, que cuentan con control total de accesos, enlaces a desnivel y flujos direccionales segregados físicamente. Soportan velocidades operacionales de entre 100 y 120 km/h e incluyen sistemas de tarificación (peajes manuales o electrónicos *free-flow*).
- **Autovías (*Trunk*):** Carreteras de altas prestaciones exentas de cobro. Aunque separan los sentidos de tránsito, carecen de un control absoluto de sus accesos. Están diseñadas para velocidades en torno a los 100 km/h y su función principal es enlazar grandes urbes eludiendo el cruce por zonas de alta densidad poblacional.
- **Vías Primarias (*Primary*):** Ejes troncales administrados por el Estado que estructuran la conexión entre los principales centros urbanos. En tramos interurbanos admiten velocidades máximas de 80 a 100 km/h. En el entorno urbano, funcionan como avenidas arteriales que canalizan volúmenes vehiculares considerables entre distintos sectores de la ciudad.
- **Vías Secundarias (*Secondary*):** Caminos de carácter estatal orientados a la vinculación de ciudades de menor envergadura y localidades pobladas. A nivel urbano, derivan de los ejes primarios para distribuir el tráfico hacia zonas intermedias, caracterizándose por capacidades de flujo y velocidades de operación moderadas.
- **Vías Terciarias (*Tertiary*):** Infraestructura destinada a la interconexión de asentamientos menores, presentando comúnmente carpetas de rodadura no pavimentadas (ripio) en zonas rurales, con restricciones de velocidad cercanas a los 40 km/h. En el entramado urbano, actúan como vías colectoras que alimentan a la red superior y derivan los viajes hacia los barrios.
- **Calles Residenciales (*Residential*) y Pasajes (*Living Street*):** Vías de carácter estrictamente local destinadas al acceso de viviendas. En el caso de los pasajes (cuyo perfil típico no supera los 3 metros de ancho), se otorga prioridad al desplazamiento peatonal. Para los fines analíticos de este estudio, ambas clasificaciones se homologaron debido a que comparten perfiles de muy bajo volumen de tránsito y velocidades reducidas.

La asignación de emisiones a cada celda de la grilla se realiza proporcionalmente a la longitud ponderada de vías en la celda, aplicando factores de peso que reflejan la participación diferencial de cada tipo de vía en el flujo vehicular total [86]:

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{región}} \times \frac{\sum_{\text{tipo}} [L_{\text{tipo,celda}} \times w_{\text{tipo}}]}{\sum_{\text{celdas}} \sum_{\text{tipo}} [L_{\text{tipo,celda}} \times w_{\text{tipo}}]} \quad (2.34)$$

Donde  $E_{\text{celda}}$  es la emisión asignada a una celda específica,  $E_{\text{región}}$  es la emisión regional total,  $L_{\text{tipo,celda}}$  es la longitud de vía del tipo funcional en la celda (en km), y  $w_{\text{tipo}}$  es el factor de peso correspondiente al tipo de vía.

Los factores de peso promedio empleados son: 54 % para autopistas, 23 % para vías arteriales, 16 % para colectoras y 7 % para vías locales [86]. Estos factores se calibran con datos de conteos de tráfico en barreras de peaje de carreteras interurbanas (Ministerio de Obras Públicas, MOP) y encuestas origen-destino en vías urbanas (SECTRA) [86]. Las emisiones urbanas se distribuyen adicionalmente entre las ciudades de cada región según su población (datos del INE), asignando emisiones urbanas a ciudades con más de 5.000 habitantes [86]. La distribución espacial se ejecuta mediante el *software* de SIG QGIS (código abierto), que permite la intersección geoespacial entre la red vial clasificada y la grilla de celdas [86, 116].

### **Diferenciación Territorial: Entorno Urbano e Interurbano**

La separación de las emisiones en categorías urbanas e interurbanas es un procedimiento fundamental y necesario, ya que no solo permite modelar adecuadamente la exposición de la población a los contaminantes, sino también para caracterizar las distintas dinámicas operacionales del parque automotor. La categorización de cada arco de la red vial se ejecutó mediante técnicas de geoprocesamiento avanzado, intersectando la infraestructura vial con polígonos que delimitan las áreas urbanas. Los límites urbanos vectoriales fueron suministrados por la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN), basados en el marco censal 2008-2010. Siguiendo los lineamientos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), se consideró como ciudad.<sup>a</sup> todo asentamiento urbano que supere los 5.000 habitantes. El modelo restringe la asignación urbana exclusivamente a estas ciudades mayores, asumiendo que concentran la gran mayoría de la actividad vehicular a nivel regional, y excluyendo poblados de menor envergadura. Bajo este esquema, un tramo vial adquiere la categoría de urbano si se encuentra espacialmente contenido dentro del polígono de una ciudad reconocida. Por contraparte, las rutas interurbanas



engloban toda la infraestructura fuera de estos límites. Como excepción metodológica, las vías catalogadas como Autopistas (*Motorway*) y Autovías (*Trunk*) reciben siempre un tratamiento operacional de ruta interurbana, incluso cuando atraviesan el tejido urbano. Esta consideración se justifica debido a que sus patrones de flujo (tránsito de paso, altas velocidades, control de accesos) y su consiguiente perfil de emisiones responden a una dinámica de movilidad regional y no local.

## Caracterización y Modelación de Flujos Vehiculares

Para prorratear correctamente el inventario de emisiones sobre la red, es fundamental determinar la carga vehicular relativa que soporta cada tipo de ruta. Esta cuantificación se sustenta en campañas sistemáticas de aforos vehiculares ejecutadas por entidades gubernamentales en diversos escenarios geográficos.

### Dinámica de Flujos Urbanos

En el contexto urbano, la principal fuente de datos proviene de los estudios de aforo gestionados por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA). Estas campañas abarcaron 24 urbes representativas a lo largo del país (incluyendo capitales regionales y ciudades de gran envergadura como Santiago, Valparaíso, Concepción y Antofagasta, entre otras).

El levantamiento de datos combinó en esencia dos metodologías de medición:

- **Monitoreo continuo:** Basado en estaciones permanentes equipadas con espiras inductivas, capaces de registrar flujos las 24 horas del día durante meses. Permiten contabilizar el volumen total y, en ciertos casos, clasificar automáticamente el tipo de vehículo.
- **Aforos periódicos o muestrales:** Conteos manuales ejecutados en franjas horarias específicas y diferenciados por tipología de día (laboral, sábado o domingo). En días hábiles, se dividen típicamente en períodos punta (mañana, mediodía, tarde, noche) y períodos valle.

Para homologar los conteos muestrales a volúmenes diarios, se aplicaron factores de expansión fundamentados en la metodología de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Este factor vincula el flujo diario total de una estación continua con el volumen registrado en un período específico dentro de esa misma estación:

$$F_{\text{exp}} = \frac{TDC_{\text{estación}}}{TCP_{\text{estación}}} \quad (2.35)$$

Donde  $F_{\text{exp}}$  es el factor de expansión,  $TDC_{\text{estación}}$  representa el Tráfico Diario Continuo medido en la estación de referencia, y  $TCP_{\text{estación}}$  es el Tráfico del Conteo Periódico en la misma franja horaria. Posteriormente, el Tráfico Diario Estimado ( $TDE$ ) para un punto con medición parcial se extrapola como:

$$TDE_{\text{sito}} = TCP_{\text{sito}} \cdot F_{\text{exp}} \quad (2.36)$$

Esta formulación permite en primer lugar escalar aforos de corta duración (2 a 4 horas) y luego transformarlos en estimaciones representativas de 24 horas, apoyándose en los perfiles temporales validados por las estaciones continuas de la misma urbe. Una vez normalizados los flujos a valores diarios, se derivaron promedios de intensidad vehicular para cada categoría vial (desde *motorway* hasta *residential*). En aquellas ciudades que carecían de aforos in situ, se imputaron valores promedio tomando como referencia urbes de similar magnitud demográfica, utilizando la clasificación del INE (Ciudad, Ciudad Mayor, Gran Área Urbana y Metrópolis).

### Dinámica de Flujos Interurbanos

El perfil de tráfico en las redes interurbanas se construyó a partir de dos fuentes primarias:

- **Registros de peaje:** Las concesionarias viales proveen bases de datos ininterrumpidas del volumen y clasificación vehicular que transita por los pódicos y plazas de peaje, entregando una caracterización exacta para la red concesionada (*motorway*).
- **Censos de la Dirección de Vialidad:** El MOP, a través de su Departamento de Estadística y Censo de Tránsito, opera 845 estaciones de control distribuidas a nivel nacional, registrando la direccionalidad y composición del flujo en rutas estatales de diversa jerarquía.

La síntesis de estos datos permite generar perfiles anuales de tráfico calibrados territorialmente para cada categoría de ruta interurbana.

## Pesos Específicos para la Distribución Espacial de Emisiones

Para proyectar y desagregar las emisiones sobre una grilla espacial, se formuló un índice de ponderación o "peso específico" que determina qué fracción del inventario regional le corresponde a cada celda geométrica. Este ponderador se ensambla integrando las características de la infraestructura vial contenida en la celda.

En el caso de las celdas urbanas, la formulación matemática del peso específico ( $W_{U,c}$ ) conjuga tres factores: la densidad de la red (longitud), la jerarquía de la vía (factor de flujo) y el peso demográfico de la ciudad respecto a su región:

$$W_{U,c} = \rho_{\text{ciudad}} \cdot \frac{\sum_k (L_{k,c} \cdot f_{k,\text{ciudad}})}{\sum_{c \in R} \sum_k (L_{k,c} \cdot f_{k,\text{ciudad}})} \quad (2.37)$$

Donde:

- $\rho_{\text{ciudad}}$  es la fracción demográfica de la ciudad analizada respecto a la población total urbana de la región.
- $L_{k,c}$  corresponde a la longitud física (en metros) de la categoría vial  $k$  contenida dentro de la celda  $c$ .
- $f_{k,\text{ciudad}}$  es el factor de flujo empírico asociado al tipo de vía  $k$  en esa urbe específica.
- El denominador representa la sumatoria de estos atributos para todas las celdas urbanas de la región  $R$ , operando como factor de normalización.

Los factores de flujo ( $f$ ) surgen del procesamiento de los aforos vehiculares. A modo de ejemplo, para el Gran Santiago, las proporciones medias estimadas fueron: 54 % para vías expresas (*motorway/trunk*), 23 % para ejes primarios, 16 % para red secundaria y 7 % para calles locales.

La masa de emisiones finales ( $E_c$ ) asignada a una celda urbana específica resulta de multiplicar su peso geométrico por el total del inventario regional urbano ( $E_{U,\text{Reg}}$ ):

$$E_c = W_{U,c} \cdot E_{U,\text{Reg}} \quad (2.38)$$

Para las celdas situadas en zonas interurbanas, el algoritmo se simplifica al prescindir del ponderador demográfico urbano. El peso específico ( $W_{I,c}$ ) depende de manera exclusiva de la longitud y el uso relativo de la vía:

$$W_{I,c} = \frac{\sum_k (L_{k,c} \cdot f_{k,\text{inter}})}{\sum_{c \in R} \sum_k (L_{k,c} \cdot f_{k,\text{inter}})} \quad (2.39)$$

Donde  $f_{k,\text{inter}}$  es el factor de flujo característico para la carretera tipo  $k$  en el ámbito interurbano, derivado de los censos de Vialidad y registros de peaje. Naturalmente, las autopistas y rutas principales agrupan la mayor proporción de este factor frente a caminos secundarios o de ripio.

Finalmente, la carga de emisiones para una celda interurbana se computa escalando el inventario regional interurbano ( $E_{I,\text{Reg}}$ ) mediante su peso correspondiente:

$$E_c = W_{I,c} \cdot E_{I,\text{Reg}} \quad (2.40)$$

## Desagregación del Transporte Aéreo

Respecto a la elaboración de mapas de calor y a la consecuente desagregación espacial de las emisiones del transporte aéreo y marítimo, la metodología empleada para realizar esta correcta distribución de emisiones es total y completamente análoga a la metodología recién explicada para el transporte terrestre, teniendo presente algunas salvedades y particularidades de estos modos de transporte y de como se comportan y modelan espacialmente las emisiones, dado que por ejemplo para el transporte aéreo se debe considerar la separación de emisiones en sus dos fases operacionales y en el transporte marítimo también se deben programar modelos espaciales que sean consecuentes con su comportamiento territorial, considerando que el transporte marítimo también se debe separar en fases operacionales para cuantificar y estimar de manera precisas sus emisiones.

Respecto al transporte aéreo, como se explicó anteriormente este se divide en dos fases (LTO y CCD). Las emisiones del ciclo LTO se asignan espacialmente al aeropuerto correspondiente, distribuyéndose en las celdas de la grilla que contienen las coordenadas geográficas del aeropuerto [13,46]. Las emisiones de la fase de crucero se distribuyen a lo largo de las rutas de vuelo (trayectoria del gran círculo entre los aeropuertos de origen y destino), asignando emisiones proporcionalmente a la longitud del segmento de ruta dentro de cada celda y empleando el factor esfuerzo transporte (FKM) para encontrar el peso relativo de cada ruta y luego el peso ponderado de cada celda de 1km cuadrado. Los aeropuertos y las rutas aéreas generadas y luego usadas para realizar la desagregación de las emisiones se presentan en la Figura 2.8. Para vuelos internacionales, solo se

contabilizan las emisiones dentro del espacio aéreo chileno o de la zona económica exclusiva, según la convención adoptada [13].

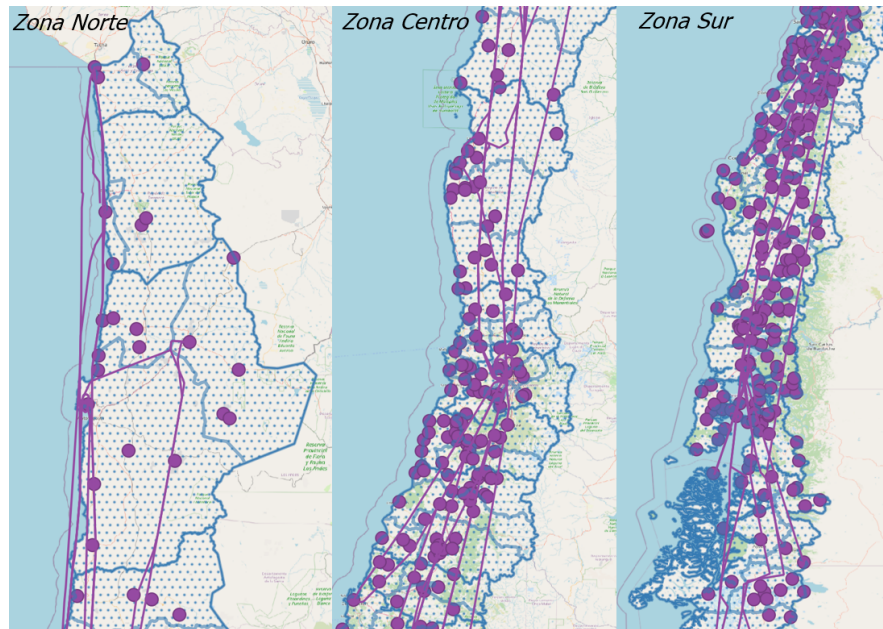


Figura 2.8: Aeropuertos y rutas aéreas elaboradas y usadas para la desagregación espacial de las emisiones. Elaboración propia mediante python y QGIS a partir de datos de fuentes oficiales.

### Introducción y Segregación de Fases Operacionales

La evaluación del impacto atmosférico provocado por el transporte aéreo exige transformar los vectores agregados de los inventarios tabulares en tensores continuos georreferenciados. A diferencia de las fuentes emisoras terrestres explicadas con anterioridad, confinadas a la rugosidad superficial, la actividad aeronáutica altera la composición química de la atmósfera tanto a nivel de capa límite urbana como en la alta troposfera y baja estratosfera, la conocida zona de tropopausa. Esta dualidad física impone la separación estricta de las emisiones en dos componentes discretos controlados por dinámicas termodinámicas y operacionales. La primera componente corresponde a la fase de Aterrizaje y Despegue (LTO, *Landing and Take-Off*), confinada por convenio internacional bajo el techo altitudinal de los 3000 ft (aproximadamente 1000 m sobre el nivel del suelo). Comprende las operaciones de rodaje de entrada y salida, despegue, ascenso inicial y aproximación final. Sus efectos son de carácter local, incidiendo directamente en los fenómenos de contaminación fotoquímica urbana y en la exposición de

la población a material particulado y óxidos de nitrógeno en las inmediaciones de las terminales aeroportuarias. La segunda componente abarca la fase de Crucero, Ascenso Superior y Descenso (CCD), desarrollada por encima del umbral del LTO hasta alcanzar las altitudes óptimas de vuelo de largo recorrido, típicamente situadas entre los 9000 m y 12000 m de altura. En este estrato atmosférico, la inyección de precursores como el dióxido de azufre, vapor de agua y hollín cataliza la formación de estelas de condensación alterando el balance radiativo neto de la tropopausa. El modelado de esta fase requiere una aproximación lineal continua a lo largo de las aerovías que interconectan los nodos aeroportuarios del país.

### Formulación del Esfuerzo de Transporte y Distribución Tabular

Antes de ejecutar la dispersión geográfica, el inventario maestro consolidado a nivel nacional debe ser particionado para reflejar la actividad real de cada ruta de la red aérea. El indicador físico que gobierna la asignación de la masa en la fase de crucero es el Esfuerzo de Transporte, cuantificado operacionalmente mediante la variable de Kilómetros-Vuelo ( $FKM$ ).

Para una ruta aérea específica  $r$  perteneciente al conjunto total de rutas de la red nacional  $R$ , el esfuerzo de transporte se define formalmente como el producto entre la frecuencia anual de operaciones de dicha ruta y su longitud ortodrómica proyectada siguiendo la siguiente relación:

$$FKM_r = N_r \cdot D_r \quad (2.41)$$

Donde  $N_r$  representa el conteo anual integrado de vuelos que recorrieron el trayecto (frecuencia operacional) y  $D_r$  es la distancia geodésica o métrica real calculada entre los centroides de los aeropuertos de origen y destino. La participación relativa de la ruta  $r$  dentro del ecosistema de movilidad nacional actúa como el motor de peso para la fragmentación del inventario global en la fase crucero. Así, la masa total del contaminante  $p$  asignada a la trayectoria  $r$  para la fase CCD ( $E_{r,p}^{CCD}$ ) se calcula mediante la relación proporcional:

$$E_{r,p}^{CCD} = E_{Total,p}^{CCD} \cdot \left( \frac{FKM_r}{\sum_{n=1}^{|R|} FKM_n} \right) \quad (2.42)$$

Por otro lado, se tiene que la fase LTO responde exclusivamente a eventos discretos de ciclos de despegue y aterrizaje en superficie, independientemente de la longitud del

viaje posterior. Por lo tanto, el factor de ponderación para la masa LTO de la ruta  $r$  ( $E_{r,p}^{LTO}$ ) se indexa directamente a partir de la frecuencia de operaciones ( $N_r$ ) relativa al volumen global de despegues del país:

$$E_{r,p}^{LTO} = E_{Total,p}^{LTO} \cdot \left( \frac{N_r}{\sum_{n=1}^{|R|} N_n} \right) \quad (2.43)$$

Estas ecuaciones garantizan que la masa total agregada en las tablas maestras sea conservada antes de ingresar al bucle geométrico espacializador:

$$\sum_{r=1}^{|R|} E_{r,p}^{CCD} = E_{Total,p}^{CCD} \quad y \quad \sum_{r=1}^{|R|} E_{r,p}^{LTO} = E_{Total,p}^{LTO} \quad (2.44)$$

### Fragmentación Topológica Determinista e Intersección de Malla

La espacialización material del vector lineal de la aerovía se realiza mediante un análisis de intersección analítica tridimensional contra una grilla regular de referencia (malla INEMA), la misma usada para la desagregación de emisiones terrestre y que esta parametrizada con celdas de resolución horizontal de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ . Evitando la rasterización proximal simple, el modelo descompone el filamento continuo de la ruta en sub-segmentos discretos delimitados por las fronteras espaciales de cada píxel.

Sea  $G$  la grilla bidimensional compuesta por celdas individuales  $C_{i,j}$ , donde  $i$  denota el índice de fila (latitud) y  $j$  el índice de columna (longitud). Al intersectar la geometría lineal de la ruta  $\mathcal{L}_r$  con el polígono contenedor de la celda  $C_{i,j}$ , se extrae un fragmento geométrico local  $\ell_{i,j,r}$ :

$$\ell_{i,j,r} = \mathcal{L}_r \cap C_{i,j} \quad (2.45)$$

Si el conjunto de intersección no es vacío, se mide la longitud real proyectada de dicho fragmento en unidades métricas empleando una proyección cartográfica local adecuada (UTM 19S para el territorio chileno continental, EPSG:32719), eliminando las distorsiones de arco esférico. La longitud del segmento se define como  $L_{i,j,r} = \text{longitud}(\ell_{i,j,r})$ . El factor de peso espacial exacto ( $W_{i,j,r}$ ) que determina la fracción de emisión de la ruta  $r$  que se deposita en la columna de aire  $(i, j)$  se formula como:

$$W_{i,j,r} = \frac{L_{i,j,r}}{\sum_m \sum_n L_{m,n,r}} \quad (2.46)$$

Este diseño asegura que el denominador equivalga a la longitud real total recalculada de la línea tras el corte topológico, forzando matemáticamente que la suma de fracciones converja a un valor de uno o de 100 en términos porcentuales, neutralizando y/o minimizando las pérdidas geométricas en los bordes periféricos del dominio geográfico estudiado.

### Distribución Vertical y Asignación Multicapa

Una vez obtenida la masa horizontal por celda, el modelo ejecuta la discretización en el eje vertical (Z), subdividiendo la atmósfera en capas discretas  $Z_k$ . El perfil de inyección responde a una heurística operacional basada en las fases de vuelo del avión.

El punto medio de cada fragmento  $\ell_{i,j,r}$  es proyectado a lo largo de la coordenada longitudinal de la ruta para estimar su distancia relativa desde el nodo de origen, normalizada respecto a la longitud total del viaje ( $t \in [0, 1]$ ). La altitud operativa efectiva  $H(t)$  en dicho punto se modela mediante la función por tramos:

$$H(t) = \begin{cases} H_0 + \left(\frac{t}{0,10}\right) \cdot (H_{\text{crucero}} - H_0) & \text{si } 0 \leq t < 0,10 \\ H_{\text{crucero}} & \text{si } 0,10 \leq t \leq 0,90 \\ H_{\text{crucero}} - \left(\frac{t-0,90}{0,10}\right) \cdot (H_{\text{crucero}} - H_0) & \text{si } 0,90 < t \leq 1,00 \end{cases} \quad (2.47)$$

Donde  $H_0$  representa el techo de la capa límite LTO (1000 m) y  $H_{\text{crucero}}$  la altitud de crucero estabilizada (11000 m). Una vez calculada  $H(t)$ , el algoritmo mapea dicho valor al índice de capa vertical correspondiente  $k$  minimizando la distancia euclidiana en el vector vertical:

$$k = \arg \min_m |Z_m - H(t)| \quad (2.48)$$

Por consiguiente, la inyección de masa por crucero para una celda tridimensional específica  $(k, i, j)$  y un contaminante  $p$  se expresa como la acumulación integrada de todas las trayectorias concurrentes:

$$M_{k,i,j,p}^{CCD} = \sum_{r=1}^{|R|} \left( E_{r,p}^{CCD} \cdot W_{i,j,r} \cdot \delta_{k, \text{layer}(H_r(t))} \right) \quad (2.49)$$

Por su parte, la emisión LTO se comporta como una inyección puramente puntual confinada a la capa superficial de la atmósfera ( $k = 0$ , correspondiente al nivel del



suelo y hasta los 1000 m). Al extraer las coordenadas exactas de los nodos extremos de la línea, se identifican las celdas de la grilla que contienen al aeropuerto de origen  $(i_r^{orig}, j_r^{orig})$  y al de destino  $(i_r^{dest}, j_r^{dest})$ . La masa se divide simétricamente entre ambas terminales operacionales:

$$M_{k,i,j,p}^{LTO} = \sum_{r=1}^{|R|} \frac{E_{r,p}^{LTO}}{2} \cdot \delta_{k,0} \cdot \left[ \delta(i, i_r^{orig}) \delta(j, j_r^{orig}) + \delta(i, i_r^{dest}) \delta(j, j_r^{dest}) \right] \quad (2.50)$$

Donde  $\delta$  es la función delta de Kronecker. La masa total integrada en cualquier celda tridimensional corresponde a la superposición lineal de ambas componentes matriciales:

$$M_{k,i,j,p}^{Total} = M_{k,i,j,p}^{CCD} + M_{k,i,j,p}^{LTO} \quad (2.51)$$

### Continuidad de Red y Operador de Piso Infinitesimal

Un requerimiento fundamental para la auditoría y la correcta visualización cartográfica de estos resultados y desagregación espacial de las emisiones aéreas es evitar la existencia de celdas con valores nulos o vacíos en las trayectorias físicas de las aeronaves. Al aplicar escalas cromáticas logarítmicas, indispensables para visualizar el contraste extremo entre los aeropuertos y las rutas, el valor cero absoluto genera una indeterminación matemática. Esto fragmenta visualmente la infraestructura de conectividad de la red aérea. Para solucionar esta distorsión sin alterar la física del inventario, se implementa un Operador de Piso Infinitesimal ( $\mathcal{P}_\omega$ ). Cuando el motor de intersección determina que una aerovía cruza analíticamente por una celda, pero la cuota de emisión calculada es nula o infinitesimal, se fuerza un piso de fondo de seguridad  $\omega$ :

$$\tilde{M}_{k,i,j,p}^{CCD} = \max \left( M_{k,i,j,p}^{CCD}, \omega \right) \quad (2.52)$$

El parámetro  $\omega$  se establece fijamente en  $1 \times 10^{-15}$  Gg. Este valor es numéricamente invisible para los balances de masa globales del modelo, pero proporciona un número real positivo finito para la transformación logarítmica ( $\log_{10}(10^{-15}) = -15$ ). Aquello fuerza la renderización completa y continua de las líneas de la red aérea en el espacio rasterizado.

## Validación Rigurosa y Redistribución Proporcional de la Deriva Numérica

El procesamiento en cascada de millones de fragmentos espaciales mediante aritmética computacional de coma flotante introduce de forma inevitable y sistemática errores microscópicos acumulativos por redondeo y truncamiento. Aunque se utilicen tipos de datos de doble precisión, la integración numérica de la matriz espacializada diverge ligeramente respecto a los agregados de los inventarios tabulares originales.

Para subsanar esta deriva y asegurar un balance de masa absoluto, se implementa un algoritmo de control de calidad y ajuste dinámico post-voxelización. Primero, se cuantifica el error residual absoluto global ( $\Delta_p$ ) para cada contaminante:

$$\Delta_p = E_{\text{Tabular},p}^{\text{Total}} - \sum_k \sum_i \sum_j M_{k,i,j,p}^{\text{Total}} \quad (2.53)$$

Si el valor absoluto de esta desviación supera un límite de tolerancia estrictamente configurado ( $\epsilon = 1 \times 10^{-5}$  Gg), el modelo activa un mecanismo de corrección proporcional distributiva. El error residual no se esparce de forma homogénea en el espacio, sino que se inyecta exclusivamente en aquellas celdas que ya poseen actividad emisora registrada, ponderado por su importancia relativa original:

$$M_{k,i,j,p}^{\text{Total, Corregido}} = M_{k,i,j,p}^{\text{Total}} + \left( \frac{M_{k,i,j,p}^{\text{Total}}}{\sum_{(m,n,l) \in \Omega} M_{m,n,l,p}^{\text{Total}}} \right) \cdot \Delta_p \quad (2.54)$$

Donde  $\Omega$  representa el conjunto de celdas indexadas cuyo valor inicial es mayor que cero. Para mantener la consistencia interna, esta misma fracción de ajuste se propaga hacia los tensores independientes de cada fase operativa:

$$M_{k,i,j,p}^{\text{CCD, Corregido}} = M_{k,i,j,p}^{\text{CCD}} + \left( \frac{M_{k,i,j,p}^{\text{CCD}}}{\sum_{m,n,l} M_{m,n,l,p}^{\text{Total}}} \right) \cdot \Delta_p \quad (2.55)$$

$$M_{k,i,j,p}^{\text{LTO, Corregido}} = M_{k,i,j,p}^{\text{LTO}} + \left( \frac{M_{k,i,j,p}^{\text{LTO}}}{\sum_{m,n,l} M_{m,n,l,p}^{\text{Total}}} \right) \cdot \Delta_p \quad (2.56)$$

Tras la aplicación de este operador, el sistema ejecuta una re-auditoría automatizada de control. La masa final integrada en los cubos multidimensionales alcanza un alineamiento perfecto con el inventario tabular de origen, forzando la convergencia del error computacional a un cero absoluto real:

$$\text{Error Residual Final} = \left| \sum_{k,i,j} M_{k,i,j,p}^{\text{Total, Corregido}} - E_{\text{Tabular},p}^{\text{Total}} \right| \equiv 0,0 \text{ Gg} \quad (2.57)$$

Este marco lógico de validación otorga al inventario espacializado un rigor metodológico propio de una investigación de posgrado, garantizando la coherencia física necesaria para modelos de calidad del aire en donde consecuentemente serán empleados todos estos resultados obtenidos de desagregación espacial.

## Desagregación del Transporte Marítimo

Por otro lado, en la Figura 2.9 se presentan las rutas marítimas realizadas y usadas para la desagregación de las emisiones. La desagregación espacial del transporte marítimo aprovecha directamente la información de posición georreferenciada contenida en las señales AIS [114]. Las emisiones calculadas para cada embarcación entre dos señales AIS consecutivas se asignan a la celda de la grilla correspondiente a la posición geográfica de la embarcación. Para el trayecto entre dos posiciones AIS sucesivas, las emisiones se distribuyen proporcionalmente a lo largo de la trayectoria interpolada, asignando a cada celda la fracción correspondiente al segmento de trayectoria que la cruza [113, 114]. Esta metodología permite obtener mapas de emisiones marítimas de alta resolución que reflejan directamente los patrones reales de tráfico naval, sin necesidad de recurrir a variables *proxy* adicionales.

La distribución espacial del inventario de emisiones provenientes del transporte marítimo nacional (correspondiente a operaciones de cabotaje y actividad portuaria) se resuelve de manera análoga a los otros medios de transporte, lo cual es mediante un proceso de discretización topológica avanzada sobre la malla de referencia institucional INEMA. Recordemos que esta grilla posee una resolución geomática de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  (aproximadamente  $1 \times 1$  km en latitudes templadas), proyectada bajo el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS-Chile / EPSG:4326). Este modelo opera bajo un enfoque macro-estructural de conservación de masa, al igual que los anteriores, transformando los inventarios escalares consolidados en las fases de estimación analítica (*Bottom-Up* y *Tier 3* según las directrices de la guía *EMEP/EEA*) en un campo espacial de tensores bidimensionales y tridimensionales continuos.

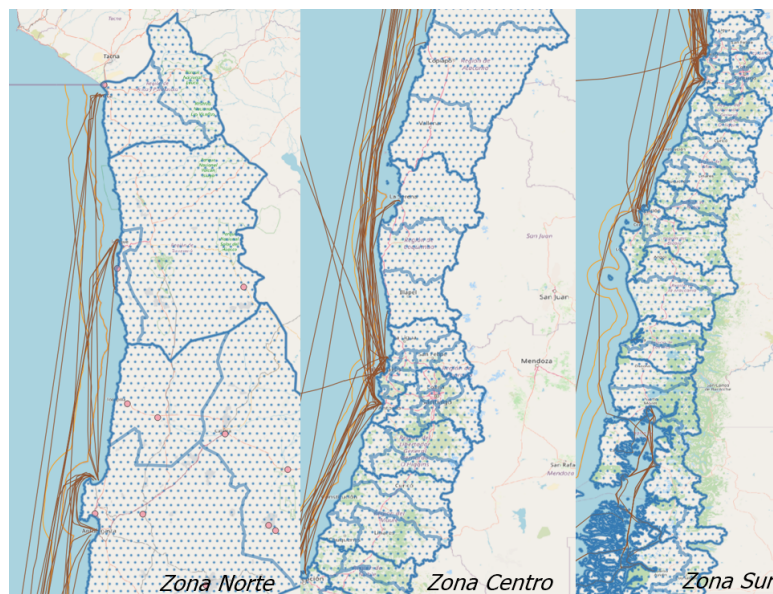


Figura 2.9: Rutas marítimas elaboradas y usadas para la desagregación espacial de las emisiones. Elaboración propia mediante python y QGIS a partir de datos de fuentes oficiales.

## Ingesta e Integración de Fuentes Geospaciales y Tabulares

El pipeline de datos integra fuentes de naturaleza heterogénea (vectorial y alfanumérica). Para la estructuración cartográfica de la actividad se implementó un protocolo de acoplamiento fundamentado en dos componentes:

1. **Nodos Portuarios Estacionarios:** Representan la ubicación geoespacial exacta de los terminales marítimos nacionales. Las coordenadas geográficas de los centroides de los puertos se extrajeron de la base de datos de elaboración propia de actividad portuaria (Hoja 8\_Coordenadas\_QGIS), actuando como puntos de inyección analítica para las fases de inercia operativa.
2. **Red de Navegación Oceánica Vectorial:** Las trayectorias de tránsito se espacializaron mediante una operación de unión relacional indexada (*Inner Join*). Se utilizó la llave primaria ID\_RUTA (o ROUTE\_KEY), presente en el archivo tabular de emisiones de crucero (Hoja 8\_QGIS\_Rutas), para interceptar la tabla de atributos del archivo vectorial *rutas\_maritimas\_nacionales.shp*. Este procedimiento dota a cada polilínea de sus respectivas cargas de masa anuales por especie química ( $p$ ).

## Conceptualización Geométrica de las Fases Operacionales

Con el objetivo de cumplir con los estándares internacionales de modelación atmosférica y mitigar anomalías por doble contabilidad o solapamiento físico en las celdas costeras, el comportamiento del buque se subdividió en tres fases operacionales físicamente independientes siguiendo lo explicado anteriormente, ya que cada fase tiene sus características propias como factores de carga empleados para cada embarcación, tiempos asociados a cada fase, etc. Se define un radio de influencia transicional ( $R_{man}$ ) de 3 millas náuticas ( $\approx 5,55$  km) alrededor del centroide de cada puerto para establecer el límite de la zona de aproximación costera siguiendo las metodologías internacionales.

Tabla 2.12: Caracterización Geométrica y Topológica de las Fases Marítimas

| Fase Operacional                            | Geometría de Entrada                | Regla de Asignación Espacial                                                                             | Criterio de Exclusión y Restricción Topológica                                                                                 |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Estadía / Atraque (<i>Hotelling</i>)</b> | Nodo Puntual ( <i>Point</i> )       | Inyección directa al 100 % en el píxel interceptado por el centroide del puerto.                         | Dispersión nula. Confinada estrictamente a la celda de amarre. Coincide con la cota $Z = 0$ .                                  |
| <b>Maniobra (<i>Maneuvering</i>)</b>        | Polígono ( <i>Buffer Area</i> )     | Distribución de área ponderada sobre las celdas intersecadas por el buffer circular de radio $R_{man}$ . | Restringida a aguas abrigadas y canales de acceso. Operación aditiva sobre la fase de estadía.                                 |
| <b>Crucero (<i>Cruising</i>)</b>            | Vector Lineal ( <i>LineString</i> ) | Intersección de línea-celda y fraccionamiento por longitud física contenida.                             | <b>Diferencia Topológica:</b> Las polilíneas se recortan y excluyen del interior del buffer $R_{man}$ para evitar redundancia. |

## Algoritmo de Intersección Topológica y Ponderación Espacial

Dado que el esfuerzo de transporte global (frecuencias, potencias de motores y tiempos de travesía) se encuentra integrado en la masa total calculada para cada ruta en la fase previa, la desagregación espacial dentro de la grilla INEMA se independiza de variables cinemáticas y se resuelve mediante un *Teorema de Fraccionamiento Geométrico* de manera análoga a lo realizado para los otros medios de transporte, teniendo en cuenta sus particularidades mencionadas, separación de fases, calculo del peso ponderado, etc.

Por ejemplo, para la **Fase de Crucero**, el algoritmo segmenta cada trayectoria marítima  $L$  con los límites fronterizos de cada celda ráster  $c$ . El peso ponderado espacial ( $W_{c,L}$ ) se define como la proporción de la longitud de la ruta contenida en la celda respecto a la longitud total de la ruta en mar abierto:

$$W_{c,L} = \frac{\int_c ds}{\oint_{L_{out}} ds} \quad (2.58)$$

Donde  $\int_c ds$  representa la longitud del segmento dentro de la celda  $c$ , y  $L_{out}$  equivale a la geometría de la ruta excluyendo las áreas internas de maniobra portuaria. Por consiguiente, la inyección de masa en fase de crucero ( $E_c^{ccd}$ ) para un contaminante  $p$  en una celda específica  $c$  se calcula como:

$$E_c^{ccd}(p) = \sum_{L \in \text{Rutas}} \left( E_{L,\text{total}}^{ccd}(p) \times W_{c,L} \right) \quad (2.59)$$

Ahora respecto a las **Fases Portuarias (Maniobra y Estadía)**, se tiene que la densidad de emisión se resuelve mediante una ponderación de área para el polígono de aproximación ( $A_{man}$ ) y una asignación delta de Dirac ( $\delta$ ) para el muelle de atraque:

$$E_c^{\text{port}}(p) = \sum_{N \in \text{Puertos}} \left( E_{N,\text{total}}^{\text{man}}(p) \times \frac{A_{\text{man}} \cap c}{A_{\text{man}}} \right) + \sum_{N \in c} E_{N,\text{total}}^{\text{hot}}(p) \quad (2.60)$$

La matriz de emisión final consolidada ( $M_{x,y}$ ) para la celda de coordenadas  $(x, y)$  y especie química  $p$  se obtiene mediante el principio de superposición lineal aditiva de las fases operacionales:

$$M_{x,y}(p) = E_{x,y}^{ccd}(p) + E_{x,y}^{\text{port}}(p) \quad (2.61)$$

### Garantía de Conservación de Masa y Auditoría de Calidad (QA/QC)

Todo proceso computacional de discretización e intersección geométrica induce errores numéricos residuales debido a los límites de precisión de la coma flotante. Para asegurar el cierre perfecto del balance de masa del inventario, lo cual es un requisito fundamental de esta investigación, se define el error residual absoluto ( $\Delta M$ ) por contaminante como:

$$\Delta M(p) = \sum_{i=1}^n E_{\text{tabular}}(i, p) - \iint_{\Omega} M_{x,y}(p) dx dy \quad (2.62)$$

Donde  $\Omega$  representa el dominio espacial de la grilla INEMA. Si el error absoluto supera el umbral de tolerancia metodológica establecido ( $\epsilon = 1 \times 10^{-6}$  Gg), el sistema activa de forma automática un operador de re-escalamiento topológico ( $\kappa$ ) sobre todas las celdas activas ( $M_{x,y} > 0$ ):

$$\kappa(p) = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{tabular}}(i, p)}{\iint_{\Omega} M_{x,y}(p) dx dy} \quad (2.63)$$

La matriz final homogeneizada y auditada ( $M_{x,y}^{\text{final}}$ ) queda determinada por la relación escalar:

$$M_{x,y}^{\text{final}}(p) = M_{x,y}(p) \times \kappa(p) \quad (2.64)$$

Este procedimiento garantiza un error numérico final de cero absoluto ( $\Delta M \equiv 0$ ).

## 2.6. Desagregación Temporal

La desagregación temporal convierte las emisiones anuales en series de emisión de resolución más fina, aplicando perfiles temporales, los cuales corresponden a factores de peso y se diferencian en función de la escala y granularidad solicitada. En esta investigación se trabaja con todas las escalas temporales exigidas para un modelo de alta resolución temporal, incluyendo la escala mensual, semanal (día de la semana) y horaria [12, 39]. El objetivo principal de realizar este análisis es capturar la variabilidad temporal de la actividad de transporte y su efecto en las emisiones, lo que resulta relevante para la modelación de la calidad del aire, la evaluación de la exposición poblacional a contaminantes y la identificación de períodos críticos de emisión.

La emisión en un período temporal específico  $t$  se obtiene aplicando el producto de los perfiles temporales a la emisión anual [39]:

$$E(t) = \frac{E_{\text{anual}} \times P_{\text{mes}}(m) \times P_{\text{día}}(d) \times P_{\text{hora}}(h)}{N} \quad (2.65)$$

Donde  $P_{\text{mes}}(m)$  es el perfil mensual para el mes  $m$ ,  $P_{\text{día}}(d)$  es el perfil del día de la semana  $d$ ,  $P_{\text{hora}}(h)$  es el perfil horario para la hora  $h$ , y  $N$  es un factor de normalización que garantiza que la suma de las emisiones sub-anuales sea igual a la emisión anual total. Por convención, el promedio de los factores de peso en cada escala temporal es igual a 1.0; valores superiores a 1 indican períodos con emisiones por encima del promedio, y valores inferiores a 1 señalan períodos con emisiones por debajo del promedio [12, 39].

La dinámica temporal de las emisiones está fuertemente condicionada por las fluctuaciones periódicas en la demanda de viajes, las cuales derivan directamente de los patrones de la actividad humana. Caracterizar esta variabilidad es un requisito indispensable para modelaciones que exigen una alta resolución temporal, tales como la simulación fotoquímica de la calidad del aire, el análisis de la exposición ciudadana a contaminantes y la gestión de episodios críticos de contaminación atmosférica.

### 2.6.1. Escalas de Variabilidad Temporal

El esquema de desagregación temporal propuesto se estructura en tres niveles jerárquicos:

- **Escala mensual:** Refleja la estacionalidad de la actividad vehicular, influenciada fuertemente por los recesos vacacionales, el calendario académico y los ciclos económicos sectoriales. Generalmente, se observa una contracción de la movilidad durante la época estival (enero y febrero) en zonas con éxodo turístico, mientras que los meses de plena actividad (marzo a julio, y septiembre a noviembre) sostienen volúmenes de tráfico más densos y constantes.
- **Escala semanal:** Diferencia el comportamiento del flujo según la naturaleza del día. Los días hábiles (lunes a viernes) agrupan los viajes obligados (trabajo y estudio), exhibiendo marcados picos de demanda. Los sábados muestran una curva de actividad más aplanada, asociada principalmente al comercio y ocio. Por su parte, los domingos registran los volúmenes vehiculares más bajos de la semana, concentrando los viajes hacia las horas de la tarde.
- **Escala horaria:** Modela la distribución intradiaria del tráfico, identificando las horas punta (*peak*) y los períodos valle. En un día hábil típico, el perfil es bimodal: un máximo matutino (07:00-09:00) dominado por los viajes de ida, y un máximo vespertino (18:00-20:00) asociado al retorno. La franja nocturna (00:00-06:00) representa el mínimo absoluto de circulación.

### Determinación de Perfiles Temporales Urbanos

Para construir los perfiles temporales del entorno urbano, se recurrió al análisis exhaustivo de aforos vehiculares continuos, los cuales registran el ciclo completo de



24 horas a lo largo de diferentes días y meses. Los datos base se extrajeron del estudio “*Implementación del Modelo de Cálculo de Emisiones Vehiculares (MODEM) en Ciudades con Planes de Transporte y Planes de Gestión de Tránsito*”, desarrollado por SECTRA. Este informe consolida mediciones ejecutadas en 22 ciudades chilenas.

La estructuración de estos perfiles se desagregó según tres variables fundamentales:

- **Categoría vehicular:** Vehículos particulares, comerciales, taxis, buses, colectivos, y camiones (livianos y pesados).
- **Tipología del día:** Lunes a Jueves, Viernes, Sábado y Domingo.
- **Franja horaria:** Matriz de 24 factores horarios normalizados.

La evaluación de la consistencia interanual demostró que la morfología de los perfiles (horarios, semanales y mensuales) se mantiene notablemente estable en el tiempo para cada urbe. Este hallazgo justificó y validó la utilización de perfiles promediados históricamente, lo que permite robustecer la representatividad estadística del modelo. Para las 22 ciudades con mediciones empíricas directas (tales como Santiago, Valparaíso, Concepción, Antofagasta, entre otras), se implementaron sus perfiles específicos. En contraste, para aquellos centros urbanos carentes de aforos continuos, se imputaron perfiles medios basados en su peso demográfico. Estos estratos se definieron como: Ciudades (5.000 a 100.000 habitantes), Ciudades Mayores (100.000 a 500.000 habitantes) y Grandes Áreas Urbanas (más de 500.000 habitantes).

## Formulación de los Factores de Distribución Temporal

Por lo general, los perfiles horarios provenientes de aforos brutos se encuentran normalizados tomando como referencia el volumen máximo del día hábil (típicamente las 08:00 a.m.). Para que estos perfiles sean aplicables al cálculo de emisiones, deben transformarse en fracciones matemáticas cuya sumatoria sea igual a la unidad (1.0) para el ciclo temporal analizado.

**1. Factor de distribución horaria:** Para una categoría de vehículo  $v$  en un tipo de día  $d$ , el factor horario  $f_{h,d,v}$  cuantifica la porción de las emisiones diarias que toma lugar en la hora  $h$ :

$$f_{h,d,v} = \frac{q_{h,d,v}}{\sum_{i=1}^{24} q_{i,d,v}} \quad (2.66)$$

Donde  $q_{h,d,v}$  representa el volumen vehicular (o su valor normalizado) medido en la hora  $h$ , para el día  $d$  y el vehículo  $v$ .

**2. Factor de distribución semanal:** El parámetro diario  $f_{d,v}$  establece la proporción de emisiones de la semana que se le atribuye a un tipo de día  $d$  específico:

$$f_{d,v} = \frac{Q_{d,v}}{\sum_j (m_j \cdot Q_{j,v})} \quad (2.67)$$

Donde  $Q_{d,v}$  es el volumen total diario para el tipo de día  $d$ . El denominador evalúa la suma sobre todos los tipos de día de la semana  $j$ , ponderados por su multiplicidad  $m_j$  (por ejemplo, el bloque "lunes-jueves" tiene una multiplicidad de 4, mientras que el viernes, sábado y domingo tienen multiplicidad 1).

**3. Factor de distribución mensual:** El coeficiente mensual  $f_{m,v}$  determina la cuota de las emisiones anuales que ocurre en un mes  $m$  en particular:

$$f_{m,v} = \frac{V_{m,v}}{\sum_{k=1}^{12} V_{k,v}} \quad (2.68)$$

Donde  $V_{m,v}$  es el nivel de actividad vehicular medio registrado durante el mes  $m$  para la categoría  $v$ .

Al aplicar estas ponderaciones de forma secuencial, es posible fragmentar el inventario total anual de emisiones hasta alcanzar resoluciones temporales de gran precisión según lo requerido (escala horaria), asegurando en todo momento la conservación de la masa total emitida gracias a que los factores de cada subnivel suman exactamente uno. Estos perfiles temporales se construyen a partir de múltiples fuentes de información. El perfil mensual se deriva de las estadísticas de ventas mensuales de combustible (SEC), ajustadas por variaciones estacionales en la demanda de transporte debidas a períodos vacacionales (enero-febrero y julio), actividad económica y condiciones climáticas [7, 39]. El perfil semanal se obtiene de datos de conteos continuos de tráfico vehicular en estaciones permanentes del MOP y de SECTRA, diferenciando entre días laborables (lunes a viernes), sábados y domingos/festivos [7]. En cuanto al perfil horario, este captura el patrón diurno del tráfico, con los característicos picos de demanda matutino (7:00-9:00) y vespertino (17:00-20:00) en días laborables [7].

La base de datos CAMS-TEMPO (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service TEMPO*ral profiles) proporciona perfiles temporales globales con resolución de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  que se utilizan como referencia e internamente para validación cruzada [39]. Los perfiles CAMS-TEMPO para Chile se evalúan contra los datos locales de conteos

de tráfico y ventas de combustible, y se ajustan cuando se identifican discrepancias significativas. La variabilidad espacial de los perfiles entre diferentes regiones de Chile se considera, reflejando las diferencias en patrones de movilidad entre el norte árido, la zona central y el sur más frío del país [12,39].

Para el transporte marítimo, el procedimiento realizado es análogo al ya explicado y se ha mencionado anteriormente en la sección de desagregación espacial por su vinculación directa e inmediata en la programación modular realizada, esta tiene su base y fundamento en que principalmente los perfiles temporales se derivan directamente de la distribución temporal del tráfico AIS y de la información obtenida solicita por ley de transparencia directamente a la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. La variabilidad mensual por su parte refleja patrones estacionales del comercio internacional (con picos antes de las temporadas de mayor consumo) y la variabilidad climática que afecta las operaciones portuarias, especialmente en el sur de Chile. El perfil semanal muestra diferencias menores entre días laborables y fines de semana comparado con el transporte terrestre, dado que las operaciones marítimas tienen mayor continuidad. El perfil horario se concentra principalmente en las horas de operación portuaria [114].

Ahora respecto a los perfiles temporales asociados al transporte aéreo, análogamente se tiene que estos se construyen a partir de la información obtenida solicitada por ley de transparencia a las instituciones respectivas, y se contrasta esta información con las frecuencias de vuelos publicadas por la JAC y la DGAC [20,67]. El perfil mensual refleja la estacionalidad turística (mayor actividad en enero-febrero y julio) y patrones de viajes de negocios. El perfil semanal muestra mayor actividad en días laborables para vuelos domésticos de negocios y en fines de semana para vuelos turísticos e internacionales. El perfil horario captura la concentración de operaciones entre las 6:00 y las 22:00, con picos matutinos y vespertinos determinados por los horarios de las aerolíneas.

### **2.6.2. Integración de la Desagregación Espacial y Temporal**

La convergencia de los modelos de desagregación espacial y temporal hace posible la construcción de matrices de emisión con una alta resolución en ambas dimensiones. Para estimar la masa de contaminantes emitida en una celda geográfica  $c$  específica, atribuible a una categoría vehicular  $v$  dentro de una región  $r$ , durante una hora  $h$  de un día representativo  $d$  en el mes  $m$ , se formula la siguiente relación matemática:

$$E_{c,v,r}(m, d, h) = E_{v,r} \cdot W_c \cdot f_{m,v} \cdot f_{d,v} \cdot f_{h,d,v} \quad (2.69)$$

Donde:

- $E_{c,v,r}(m, d, h)$  representa la emisión instantánea proyectada en la celda  $c$  para la coordenada temporal evaluada.
- $E_{v,r}$  equivale al inventario anual de emisiones totales generadas por la clase vehicular  $v$  en la región  $r$ .
- $W_c$  corresponde al factor de ponderación espacial de la celda  $c$ , determinando la cuota de emisiones regionales que alberga dicha grilla.
- $f_{m,v}$ ,  $f_{d,v}$  y  $f_{h,d,v}$  son los coeficientes de distribución temporal a escala mensual, diaria y horaria, respectivamente, asociados al patrón de la flota  $v$ .

El diseño de esta formulación matemática debe ser y es justamente riguroso en cuanto a la conservación de masa, dado que si se ejecuta la sumatoria espacial abarcando la totalidad de las celdas de una región, y se integra el vector temporal para abarcar el ciclo anual completo, el resultado restituirá con exactitud el volumen macro de emisiones regionales anuales establecido en el inventario original de actividad vehicular.

## 2.7. Proyecciones de Emisiones al 2050

### 2.7.1. Marco de Escenarios

Las proyecciones de emisiones se desarrollan para el horizonte 2050 bajo un conjunto de escenarios de mitigación que reflejan diferentes trayectorias de política, tecnología y desarrollo socioeconómico. El diseño de escenarios se inspira fuertemente en el marco de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) del IPCC [88] y en la estructura de escenarios del ICCT para Chile [52], adaptados al contexto de esta investigación y referenciados para cada modo de transporte analizado, ya que cada modo de transporte tendrá sus propias medidas y escenarios a simular.

Comenzando con el transporte terrestre, el diseño de escenarios de mitigación no puede sostenerse únicamente sobre el crecimiento inercial del parque automotriz. Para evaluar de manera rigurosa la viabilidad de la carbono neutralidad hacia mediados de



través del estrangulamiento de la oferta. La meta de alcanzar un 100 % de ventas de vehículos de cero emisiones para esta categoría obliga al modelo predictivo a modificar radicalmente su curva de ingreso, dado que a partir del año de corte establecido por la normativa, la tasa de renovación natural inyectará exclusivamente vehículos eléctricos al flujo vial. Esta condición de borde es el pilar metodológico que permitirá cuantificar, en las siguientes fases del estudio, la verdadera brecha de emisiones entre un escenario pasivo y uno condicionado por el Estado.

A nivel macro para la proyección a futuro de los distintos modos de transporte, se consideran tres escenarios principales que se repiten en el análisis del transporte multimodal:

- **Escenario BAU (Business as Usual):** Refleja la continuación de las tendencias históricas sin implementación de políticas adicionales de mitigación. Asume crecimiento del parque vehicular (vehículos terrestres, embarcaciones marítimas y aeronaves) según las proyecciones demográficas y económicas del Banco Central y del INE, IMO y de la ICAO respectivamente, mantenimiento de la composición tecnológica actual de la flota y renovación natural del parque vehicular.
- **Escenario NDC:** Incorpora las metas y compromisos establecidos en la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile y la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) [76, 77]. Respecto al transporte terrestre, incluye 100 % de ventas de vehículos livianos nuevos de cero emisiones para 2035, electrificación total del transporte público urbano para 2040, penetración de hidrógeno del 71 % en transporte de carga para 2050 y reducción del 40 % en emisiones directas de GEI del transporte para 2050 respecto a 2018 [2].
- **Escenario Ambicioso (Compatible con París):** Representa una trayectoria alineada con el objetivo de limitar el calentamiento global a 1.5°C, consistente con el escenario SSP1-1.9 y las evaluaciones de Climate Analytics para Chile [10]. Por ejemplo, para el transporte terrestre, este escenario contempla una electrificación acelerada del transporte (90 % para mediados de siglo), eliminación temprana de vehículos de combustión interna y la implementación intensiva de medidas *Avoid-Shift-Improve* (ASI) [91, 100].

### 2.7.2. Variables de Proyección

La proyección de emisiones para cada escenario se construye mediante la evolución temporal de las siguientes variables clave:

- **Flota vehicular:** crecimiento del parque vehicular por categoría, basado en proyecciones de población, producto interno bruto, tasas de motorización y saturación, elasticidad tráfico/PIB, etc.
- **Composición tecnológica:** penetración de vehículos eléctricos (BEV), vehículos de celda de combustible de hidrógeno (FCEV), híbridos y otros, según las curvas de adopción de cada escenario.
- **Nivel de actividad:** evolución del VKT por categoría, considerando efectos de urbanización, teletrabajo, cambio modal y eficiencia logística.
- **Factores de emisión:** evolución de los estándares de emisión aplicables (Euro 7/VII y posteriores), mejora en eficiencia energética de motores de combustión interna, y factores de emisión nulos para vehículos eléctricos (emisiones directas).
- **Demandas del transporte:** Se deben considerar proyecciones del volumen de comercio exterior para el transporte marítimo de Chile (DIRECTEMAR, OECD), eficiencia energética de la flota naviera (EEXI, CII) y penetración de combustibles alternativos marítimos (amoníaco verde, metanol verde). También se consideran, respecto al transporte aéreo, proyecciones de crecimiento de pasajeros (JAC, ICAO), eficiencia de nuevas aeronaves, penetración de combustibles sostenibles de aviación (SAF), etc.

La metodología de proyección emplea un enfoque de contabilidad *bottom-up* en el cual las emisiones futuras para cada año de proyección se calculan como [37, 95]:

$$E(\text{año}, n) = \sum_i [N_i(\text{año}) \times KM_i(\text{año}) \times EF_{i,n}(\text{año})] \quad (2.70)$$

Donde  $N_i(\text{año})$  es el número de vehículos del tipo  $i$  en el año proyectado,  $KM_i(\text{año})$  es el kilometraje anual promedio y  $EF_{i,n}(\text{año})$  es el factor de emisión del contaminante  $n$ , todos ellos evolucionando según las trayectorias definidas por cada escenario. Este enfoque es consistente con la metodología empleada en la herramienta LEAP (*Low*

*Emissions Analysis Platform*) [79,95] y con la Guía de Proyecciones del programa Giro Limpio [36].

La evolución de la flota vehicular se modela mediante un esquema de cohortes por año de fabricación (*vintage model*), donde los vehículos nuevos ingresan al parque según la tasa de crecimiento proyectada y los vehículos existentes se retiran según curvas de supervivencia específicas por categoría vehicular. La composición tecnológica de los vehículos nuevos varía en el tiempo según las tasas de penetración de tecnologías limpias definidas para cada escenario. Por ejemplo, para el transporte marítimo y aéreo, las proyecciones incorporan las metas de la Estrategia 2023 de la IMO [57] y los objetivos de descarbonización de ICAO/CORSIA [43,45], respectivamente.

### Estructura del modelo de proyección marítimo

Profundizando un poco más en la proyección del transporte marítimo, la estimación de las emisiones hacia el año 2050 se fundamenta en tres variables independientes que operan de manera multiplicativa y simultánea sobre los niveles del año base. El modelo matemático se expresa de la siguiente forma:

$$E(\text{año}, s) = E_{\text{base}}(2023, s) \times f_{\text{act}}(\text{año}) \times f_{\text{eff}}(\text{año}) \times f_{\text{EF}}(\text{combustible}, \text{año}) \quad (2.71)$$

El multiplicador de actividad, denotado por  $f_{\text{act}}$ , refleja el aumento del transporte marítimo y se determina mediante la relación  $f_{\text{act}} = (1 + \text{CAGR}_{\text{tramo}})^n$ , donde  $n$  representa la cantidad de años en el intervalo temporal y  $\text{CAGR}_{\text{tramo}}$  corresponde a la tasa de crecimiento anual compuesta para un periodo y escenario específicos.

Por otro lado, el multiplicador de eficiencia,  $f_{\text{eff}}$ , ilustra la disminución acumulativa del gasto energético por cada recalada, producto de optimizaciones técnicas (EEXI, mejoras en hélice o casco) y operativas (CII, optimización de rutas). Se calcula como  $f_{\text{eff}} = (1 - r_{\text{eff}})^n$ , siendo  $r_{\text{eff}}$  la tasa anual de mejora.

Finalmente, el factor asociado a la matriz de combustibles,  $f_{\text{EF}}$ , ajusta las emisiones de cada agente contaminante de acuerdo con la proporción de energía aportada por cada tipo de combustible (como VLSFO, GNL o alternativas de cero GEI) en el año proyectado. Esto se logra realizando una interpolación lineal entre los puntos de control definidos para los años 2023, 2030, 2040 y 2050 en cada escenario.

La solidez de esta formulación radica en que, para el escenario de línea base (E0), los factores se mantienen neutros ( $f_{\text{eff}} = 1,0$  y  $f_{\text{EF}} = 1,0$ ). Esto implica que al no



haber adopción de nuevas tecnologías ni cambios en la matriz energética, las emisiones aumentan en proporción directa al tráfico. En contraste, en los escenarios de descarbonización profunda (E3 a E5), las fuertes reducciones impulsadas por  $f_{\text{eff}}$  y  $f_{\text{EF}}$  compensan con creces el alza de  $f_{\text{act}}$  durante la segunda mitad del periodo evaluado, logrando así disminuciones netas y absolutas en las emisiones a pesar del incremento en la actividad comercial.

### 2.7.3. Explicación de los escenarios marítimos a simular

#### E0 – Línea Base (*Business as Usual*)

Este caso modela la evolución de las emisiones asumiendo que no se implementarán políticas de mitigación adicionales a las ya establecidas antes de 2023, es decir, la normativa *Sulphur Cap 2020* ya se encuentra integrada en la línea base. El incremento de la actividad se establece con un CAGR del 2,0 % anual para el tramo 2023–2030, un 1,8 % para 2031–2040 y un 1,5 % para 2041–2050.

La tasa inicial supera de manera conservadora el crecimiento histórico reportado por DIRECTEMAR (1,3 % anual entre 2015 y 2023), tomando en consideración la reactivación post-pandemia y el alza esperada en el comercio exterior de Chile según CAMPORT (2024). De acuerdo con Mordor Intelligence (2026), se proyecta un CAGR del 5,86 % para el sector logístico y de fletes chileno entre 2026 y 2031, de dicha cifra se extrae una estimación cautelosa del 2,0 % para el componente netamente marítimo.

#### E1 – Eficiencia Energética EEXI/CII

El escenario E1, al igual que todos los demás escenarios simulados, contempla la electrificación gradual de los puertos chilenos (OPS) y los avances en eficiencia energética impulsados por las normativas EEXI y CII, en plena vigencia desde el 1 de enero de 2023 (DNV, 2023). Se postula una disminución acumulativa del 1,5 % anual en el consumo de energía por recalada a partir de 2023.

Esta proporción es consistente con las estimaciones elaboradas por Danish Ship Finance (2022) respecto al efecto del CII en las calificaciones A y B, las cuales exigen mejoras conjuntas y constantes en la velocidad, el trimado y el mantenimiento del casco. La curva de actividad se mantiene idéntica al escenario E0, dado que las medidas de eficiencia no modifican el volumen de tráfico. La matriz energética se conserva 100 % dependiente de VLSFO, por lo que la mitigación de emisiones responde de forma

directamente proporcional a la eficiencia lograda.

## **E2 – Penetración de Gas Natural Licuado (LNG)**

El escenario E2 simula un cambio progresivo hacia el uso de GNL como propulsor marino, una alternativa tecnológica que actualmente experimenta una fuerte expansión en segmentos específicos como portacontenedores, transbordadores y cruceros. Se estima que la penetración del GNL abarcará el 15 % de la energía consumida en 2030 y llegará al 50 % en 2050, cubriéndose la mitad restante con VLSFO.

En esta proyección, la optimización operativa es la misma que en el escenario E1, bajo la premisa de que una fracción importante de las inversiones se destinará a la reconversión de las plantas propulsoras. Los índices de emisión del GNL, extraídos de las Directrices LCA de la OMI (IMO, 2023) y ClassNK (2024), evidencian caídas del 27 % en CO<sub>2</sub> (*Tank-to-Wake*), del 88 % en NO<sub>x</sub> y del 98 % en SO<sub>2</sub> frente al VLSFO. No obstante, es imperativo considerar en la evaluación de ciclo de vida que el GNL registra un mayor índice de NMVOC debido a las fugas de metano (*methane slip*) características de los motores de cuatro tiempos.

## **E3 – Combustibles Verdes**

La proyección E3 plantea una transición decidida hacia fuentes de energía con nulo o bajo impacto en GEI durante todo su ciclo de vida (*Well-to-Wake*), tales como el bio-GNL, el e-metanol verde y el amoníaco verde (e-NH<sub>3</sub>). La adopción de estas alternativas en la categoría **Cero-GEI** logra un 35 % de participación en 2040 y escala velozmente al 85 % para 2050, manteniendo apenas un 10 % de dependencia del GNL.

Esta ruta de descarbonización se encuentra alineada con las trayectorias modeladas en *Nature Scientific Reports* (2026), que emplea el entorno *MariTEAM-MESSAGEix* para cumplir con la meta climática de 1,5 °C en la industria naviera. Según estimaciones del BCG (2025), la disponibilidad comercial de amoníaco verde y e-metanol a gran escala ocurrirá en la ventana 2030–2035, sujeta al abaratamiento del hidrógeno verde y a la expansión de la capacidad electrolítica global.

## **E4 – IMO Net-Zero 2050**

El escenario E4 se estructura en estricta concordancia con las ambiciosas metas de la Estrategia Revisada de la OMI (IMO, 2023), las cuales plantean reducciones del 20

al 30 % para 2030 (respecto a niveles de 2008), del 70 al 80 % para 2040 y el logro de emisiones netas cero hacia 2050.

Para lograrlo, este modelo conjuga una tasa de eficiencia máxima del 2,0 % anual, una penetración de combustibles **Cero-GEI** del 40 % al 2040 y del 90 % al 2050, junto con un crecimiento de actividad levemente menor al del escenario de línea base (CAGR de 1,8 %, 1,5 % y 1,2 %). Esta moderación en la actividad busca representar la optimización logística y el cambio modal (*modal shift*) que habitualmente acompañan la implementación de políticas de descarbonización estrictas. Esta proyección es directamente comparable con los análisis globales del *Fourth GHG Study* de la OMI (IMO, 2020) y los modelos sectoriales del ICCT (2023).

## **E5 – Chile Acelerado**

El modelo E5 representa la apuesta más audaz y se fundamenta íntegramente en los compromisos soberanos y locales de Chile, como son la NDC 2023 (MMA, 2023), el Plan Sectorial de Transportes (MTT, 2025), la Ley de Cabotaje 2025 y las rutas de mitigación calculadas por Climate Analytics (2025) para alinear el transporte nacional con el límite de 1,5 °C.

Esta alternativa fusiona la altísima eficiencia del escenario E4 (2,0 % anual) con una penetración casi total de energéticos **Cero-GEI** para 2050 (95 %) y añade un incremento del 10 % en el tráfico exclusivo de cabotaje. El mayor contraste frente al escenario E4 se observa en la decisiva década de 2030 a 2040, asumiendo que las enérgicas políticas locales adelantarán la penetración tecnológica diez años respecto al promedio de la flota mundial.

El cambio fundamental en la composición de la matriz energética, descrito detalladamente para cada escenario, se visualiza en la figura 2.11. Este gráfico de barras permite contrastar la transición tecnológica de forma directa, mostrando cómo los escenarios de línea base (E0) e intermedios (como E1) mantienen una alta dependencia de los combustibles fósiles tradicionales. En contraste, se aprecia nítidamente la trayectoria de adopción acelerada del GNL y, posteriormente, la penetración masiva de combustibles cero-GEI en los escenarios más avanzados (E3, E4 y E5). Esta transición energética, impulsada por las políticas de descarbonización, es el principal factor explicativo de las profundas reducciones de emisiones que se logran hacia la segunda mitad del periodo proyectado, a pesar del aumento constante en el volumen de actividad marítima.

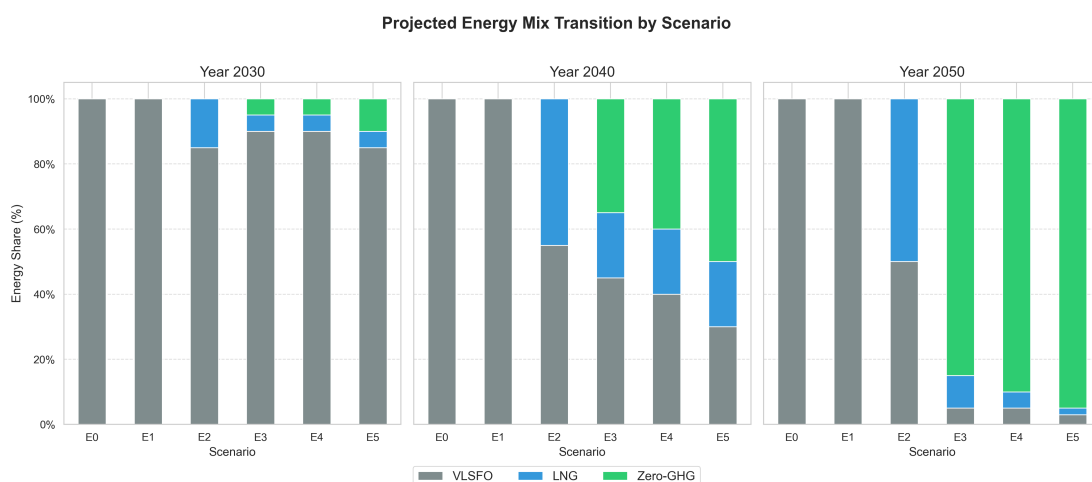


Figura 2.11: Transición proyectada de la matriz energética (%) por escenario en los hitos temporales 2030, 2040 y 2050. Se observa la penetración gradual del GNL y la adopción masiva de combustibles de cero o bajo GEI en los escenarios más ambiciosos.

## 2.7.4. Explicación de los escenarios aéreos a simular

La proyección de emisiones del transporte aéreo chileno hacia 2050 se basa en un modelo determinístico de tipo *bottom-up* calibrado en el nivel Tier 3 del *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook* [28], marco metodológico compatible con las directrices IPCC 2006 para la categoría de fuentes NFR 1.A.3.a y con la guía técnica de calidad del aire en aeropuertos de la OACI—Doc. 9889 [50]. El horizonte temporal cubre el período 2024–2050, distinguiendo en todo momento entre operaciones domésticas e internacionales y entre las dos fases de vuelo mencionadas anteriormente: la fase LTO (*Landing & Take-Off*, por debajo de los 3 000 ft) y la fase CCD (*Climb-Cruise-Descent*, por encima de los 3 000 ft).

### Datos de base y parámetros observados

El punto de partida del modelo son las estadísticas de tráfico aéreo comercial de Chile correspondientes al año 2024, publicadas por la Junta de Aeronáutica Civil (JAC). Ese año el sistema aeroportuario chileno movilizó 28,2 millones de pasajeros en total, alcanzando un registro histórico: 16,4 millones en rutas domésticas y 11,8 millones en rutas internacionales [68]. Las operaciones LTO totalizaron aproximadamente 166 000 ciclos domésticos y 35 000 ciclos internacionales anuales, con una distancia promedio de vuelo de 700 km en rutas nacionales y 6 500 km en rutas internacionales [68].

La composición de la flota se modeló a partir de tres categorías genéricas: aeronaves de fuselaje estrecho (*narrow-body*), aeronaves de fuselaje ancho (*wide-body*) y aeronaves regionales o turbohélice. Para las rutas domésticas se asumió una distribución constante de 85 % *narrow-body* y 15 % regional, reflejo de la flota operada principalmente por LATAM, Sky Airline y JetSMART durante el período de referencia [68]. Las rutas internacionales se descomponen en 45 % *narrow-body*, 50 % *wide-body* y 5 % regional. Los consumos específicos de combustible en crucero son 2,90 kg/km para aviones de fuselaje estrecho, 5,90 kg/km para los de fuselaje ancho y 1,35 kg/km para los regionales, obtenidos del estudio de quema de combustible en aeronaves jet comerciales del ICCT [53]. Los consumos por ciclo LTO se extrajeron de la Base de Datos de Emisiones de Motores de la OACI [47]: 900 kg/ciclo para *narrow-body*, 3 000 kg/ciclo para *wide-body* y 250 kg/ciclo para aeronaves regionales.

### Ecuación maestra y lógica de cálculo

Las emisiones del contaminante  $i$  en el año  $n$  se obtienen como:

$$E_i(n) = C_{\text{neto}}(n) \cdot FE_i \cdot (1 - r_{\text{TtW},i} \cdot f_{\text{SAF}}(n)) \quad (2.72)$$

donde  $C_{\text{neto}}$  es el consumo neto de combustible Jet A-1,  $FE_i$  es el factor de emisión del contaminante  $i$  (kg/kg combustible),  $r_{\text{TtW},i}$  es la reducción de emisiones en base *Tank-to-Wake* atribuible al SAF para el contaminante  $i$ , y  $f_{\text{SAF}}(n)$  es la fracción másica de SAF en la mezcla para el año  $n$ .

El consumo neto incorpora cuatro palancas de mitigación de forma encadenada:

$$C_{\text{neto}}(n) = C_{\text{bruto}}(n) \cdot \eta_{\text{eff}}(n) \cdot (1 - \delta_{\text{ATM}}) \cdot (1 - p_{\text{H}_2}(n) \cdot s_{\text{corta}}) \cdot (1 - p_{\text{NG}}(n) \cdot r_{\text{NG}}) \quad (2.73)$$

El consumo bruto  $C_{\text{bruto}}(n)$  es la sumatoria ponderada por la mezcla de flota de los consumos LTO y CCD para cada tipo de aeronave:

$$C_{\text{LTO}} = N_{\text{ops}} \cdot \sum_k f_k \cdot c_{\text{LTO},k} \quad (2.74)$$

$$C_{\text{CCD}} = D_{\text{total}} \cdot \sum_k f_k \cdot c_{k,\text{km}} \quad (2.75)$$

donde  $k$  indexa las categorías de flota,  $f_k$  es la fracción de cada tipo en la ruta,  $c_{LTO,k}$  es el consumo por ciclo LTO (kg/ciclo) y  $c_{k,km}$  es el consumo específico de crucero (kg/km).

$\eta_{\text{eff}}(n) = (1 - \eta)^{n-2024}$  recoge la mejora tendencial de eficiencia de flota mediante decaimiento exponencial.  $\delta_{\text{ATM}}$  representa la ganancia operacional por optimización de la gestión del tránsito aéreo (procedimientos CDO/CCO, rutas directas, digitalización del espacio aéreo). Los términos  $p_{\text{H}_2}(n) \cdot s_{\text{corta}}$  y  $p_{\text{NG}}(n) \cdot r_{\text{NG}}$  corresponden, respectivamente, a la penetración del hidrógeno en rutas cortas (inferiores a 1 000 km) y a la de aeronaves de nueva generación con reducción de consumo del 25 %. Los factores de emisión del Jet A-1 aplicados son: CO<sub>2</sub>, 3,16 kg/kg; H<sub>2</sub>O, 1,24 kg/kg; NO<sub>x</sub>, 0,0148 kg/kg; CO, 0,00325 kg/kg; HC (NMVOC), 0,000320 kg/kg; SO<sub>x</sub>, 0,000840 kg/kg; PM<sub>2,5</sub> (nvPM), 0,000092 kg/kg [28, 50].

### Dinámica de tráfico y parámetros macroeconómicos

El crecimiento del tráfico se obtiene multiplicando la tasa de crecimiento del PIB chileno por la elasticidad ingreso del tráfico aéreo. Se asume una tasa de crecimiento del PIB de 2,5 %/año, coherente con las proyecciones del Banco Central de Chile y el *World Economic Outlook* del FMI para el período 2024–2050 [58]. Las elasticidades adoptadas son 1,7 para el tráfico doméstico y 2,2 para el internacional, en línea con los rangos publicados por Boeing en su *Current Market Outlook 2025* [97] y consistentes con la segunda edición del Plan de Acción de Chile ante la OACI [75], que fija tasas de crecimiento tendencial de 4,0 %/año en rutas nacionales y 5,6 %/año en rutas internacionales. Estas tasas son congruentes con las perspectivas de largo plazo de Airbus para América del Sur, que proyectan crecimientos medios del orden del 3,7-4,5 % anual en pasajeros-kilómetro para la región en el período 2025–2044 [4].

### Restricción Tank-to-Wake para el SAF

Una decisión metodológica central adoptada es que la reducción de emisiones atribuible al uso de SAF se contabiliza en términos *Tank-to-Wake* (TtW), esto es, comparando las emisiones directas emitidas por la aeronave durante la combustión del SAF frente a las del Jet A-1 fósil. Queda excluido cualquier crédito derivado del análisis de ciclo de vida completo (*Well-to-Wake*), incluyendo la reducción del 70 % habitualmente reportada en el marco CORSIA de la OACI [72].

Desde el punto de vista físico-químico, el SAF y el Jet A-1 son combustibles *drop-in* certificados bajo la norma ASTM D7566, con la misma estequiometría de carbono, esto indica que la combustión de un kilogramo de SAF libera los mismos 3,16 kg de CO<sub>2</sub> directo que un kilogramo de Jet A-1. La reducción TtW de CO<sub>2</sub> por kilogramo de SAF bajo esta mirada es por consiguiente nula [28, 50]. Esta circunstancia tiene una consecuencia fundamental en los resultados del modelo, ya que el escenario de SAF aislado no reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector.

Las reducciones TtW sí se materializan en contaminantes cuya generación depende de la composición química del combustible. Para los SO<sub>x</sub>, el SAF puro carece de azufre, por lo que la reducción TtW es del 100 % [18, 108]. Para las partículas no volátiles (PM<sub>2,5</sub>/nvPM), el estudio ECLIF3, el cual corresponde a un estudio alemán que realizó la primera campaña de medición en vuelo real de un avión A350 operando con 100 % de SAF, llevada a cabo por Airbus, Rolls-Royce, el DLR y Neste en 2021 y publicada en 2024 en la revista *Atmospheric Chemistry and Physics*, este midió una reducción del 35 % en la emisión de nvPM, cota inferior conservadora dentro del rango 35-90 % reportado en la literatura [18, 108]. Para los HC (NMVOC), la menor presencia de aromáticos produce una combustión ligeramente más completa, por lo que se adopta  $r_{TtW,HC} = 10 \%$ , en el extremo conservador del rango 5–15 % indicado por el *Guidebook* EMEP/EEA [28]. Los NO<sub>x</sub> y el CO dependen de la temperatura de cámara de combustión y de la eficiencia de ignición, respectivamente, no de la composición química del combustible, por lo que sus coeficientes TtW son nulos [28, 50].

### **Validación del modelo**

Para verificar la consistencia interna del modelo con las estadísticas nacionales de emisiones, se retroproyecta el año 2020, obteniendo una estimación de aproximadamente 1 230 kt de CO<sub>2</sub>. El valor de referencia publicado en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile (INGEI), correspondiente al Quinto Informe Bienal de Actualización ante la CMNUCC, es de 1 283 kt CO<sub>2</sub> para ese año [74]. La diferencia relativa es del 4,2 %, dentro del umbral de error del 5 % aceptado para inventarios de nivel Tier 3 según el propio *Guidebook* EMEP/EEA [28].

### **Escenario de referencia (Business-as-Usual, BAU)**

El escenario BAU describe la trayectoria de emisiones que seguiría el transporte aéreo chileno en ausencia de medidas adicionales de mitigación más allá de la renovación

gradual y tendencial de la flota. El único mecanismo de reducción activo es la mejora intrínseca de eficiencia, fijada en  $\eta = 1,1 \text{ \%/año}$ , que corresponde al ritmo histórico observado por el ICCT entre 2010 y 2024 para flota global de aeronaves jet [53]. No se aplica ninguna corrección operacional por gestión del tránsito aéreo ( $\delta_{\text{ATM}} = 0$ ), tampoco hay ninguna penetración de SAF ( $f_{\text{SAF}} = 0$ ) y no existe despliegue de tecnologías alternativas de propulsión.

Bajo estos supuestos, el modelo proyecta emisiones de CO<sub>2</sub> de 4,18 millones de toneladas en 2024, que escalan hasta 13,91 millones de toneladas en 2050, representando un crecimiento acumulado de aproximadamente el 200 % en el horizonte de proyección. Este escenario cumple la función de línea de base frente a la cual se cuantifican los potenciales de reducción de todos los demás escenarios, tanto los aislados como los combinados.

### **Escenario aislado de eficiencia operacional y ATM**

Este escenario cuantifica la contribución específica de las mejoras en la gestión del tránsito aéreo y en la eficiencia de la flota, manteniendo sin cambios el resto de variables. La tasa de mejora anual de eficiencia se incrementa a  $\eta = 1,5 \text{ \%/año}$ , reflejo de una renovación de flota más activa mediante aeronaves de menor consumo, y se añade una corrección operacional  $\delta_{\text{ATM}} = 3 \text{ \%}$ , correspondiente a los ahorros esperados por la adopción generalizada de procedimientos de descenso continuo (CDO) y salida con ascenso continuo (CCO), además de la optimización de rutas mediante navegación basada en la performance (PBN).

La base normativa de estos supuestos se encuentra en el Plan de Acción de Chile ante la OACI, 2da Edición (2025), que estima que la implementación de medidas operacionales, tecnológicas y de infraestructura puede elevar la eficiencia anual en el uso de combustible de 1,1 % a 1,2 % [75]. En el plano operativo, Chile ha implementado aproximaciones simultáneas con tecnología RNP en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez y ha impulsado diversas iniciativas a través de la Mesa Vuelo Verde, que agrupa a la DGAC, la JAC, IATA y las principales aerolíneas del país [109]. El valor de 3 % adoptado para  $\delta_{\text{ATM}}$  supera levemente el umbral mínimo publicado en el Plan de Acción, pero permanece dentro de los rangos técnicamente documentados para sistemas de gestión del tránsito aéreo de complejidad comparable. Aplicando estas dos palancas de forma aislada, el modelo proyecta emisiones de CO<sub>2</sub> de 12,14 millones de toneladas en 2050, equivalentes a una reducción del 12,7 % respecto del BAU.



### Escenario aislado de SAF

El escenario de SAF aislado está construido para cuantificar el efecto puro del combustible sostenible de aviación bajo la restricción TtW. Todos los parámetros de eficiencia y ATM son idénticos al BAU ( $\eta = 1,1\%/año$ ,  $\delta_{ATM} = 0$ ), de modo que cualquier diferencia respecto de la línea de base sea atribuible únicamente a la fracción de SAF en la mezcla.

La hoja de ruta de penetración adoptada parte de cero en 2024, alcanza el 4 % en 2030 y crece hasta un techo del 50 % en 2050, siguiendo una trayectoria creciente no lineal que refleja las restricciones actuales de producción y la necesidad de escalar la infraestructura de suministro en los aeropuertos. Esta trayectoria es coherente con la Hoja de Ruta SAF 2050 de Chile, instrumento de política pública que articula la colaboración entre la DGAC, la JAC y el sector privado (aerolíneas, operadores de aeropuertos y productores de combustible), explícitamente reconocido en el Informe Ambiental 2025 de la OACI [75, 109]. A escala global, IATA fija en su compromiso *Fly Net Zero* la aspiración de que el SAF represente el 65 % del combustible consumido por la aviación en 2050 [49], esto indica que el techo del 50 % adoptado en este escenario aislado es más conservador y constituye la cota inferior de los escenarios elaborados en el presente trabajo.

Como consecuencia directa de la restricción TtW explicada con anterioridad, el CO<sub>2</sub> no se reduce en este escenario, lo cual provoca consecuentemente que las emisiones en 2050 son idénticas a las del BAU (13,91 millones de toneladas), puesto que un kilogramo de SAF libera exactamente la misma cantidad de CO<sub>2</sub> directo que un kilogramo de Jet A-1. El efecto del SAF queda circunscrito a SO<sub>x</sub> (−100 % por kilogramo de SAF empleado), PM<sub>2,5</sub>/nvPM (−35 %) y HC (−10 %), de acuerdo con los resultados de la campaña ECLIF3 mencionada anteriormente [18, 108].

### Escenario aislado de nuevas tecnologías de propulsión

Este escenario evalúa el potencial de reducción asociado exclusivamente a las tecnologías de propulsión de nueva generación, sin intervención operacional adicional ni SAF. Los parámetros de eficiencia tendencial y ATM son idénticos al BAU, pero se introduce la penetración progresiva de dos tecnologías a partir de 2035.

La primera tecnología es el hidrógeno verde como propelente, siguiendo la hoja de ruta del programa ZEROe de Airbus, cuyo objetivo era introducir en servicio una aeronave de propulsión de hidrógeno alrededor de 2035 para rutas cortas y medias [3]. Este

escenario reconoce, sin embargo, que el propio fabricante ha revisado ese calendario a la luz de los retrasos en el ecosistema de infraestructura y producción de hidrógeno, desplazando ahora sus objetivos hacia la década de 2040 [6]. Por este motivo, la penetración del hidrógeno se modela de forma gradual y se restringe a la fracción de tráfico correspondiente a rutas domésticas inferiores a 1 000 km, estimada en el 15 % del tráfico doméstico total según la distribución de rutas de la JAC [68]. La penetración alcanza el 30 % de ese segmento en 2050. Dado que en vuelo el motor de hidrógeno no emite CO<sub>2</sub>, cada kilogramo de Jet A-1 desplazado por hidrógeno suprime la totalidad de las emisiones TtW de CO<sub>2</sub> correspondientes a esa fracción del consumo.

La segunda tecnología comprende las aeronaves de nueva generación, como por ejemplo las aeronaves B737 MAX, la familia de aeronaves NEO como el A320neo y variantes de largo alcance como el B787-10 y el A321XLR. Estas plataformas ofrecen reducciones de consumo de combustible del orden del 20–25 % respecto de sus predecesoras. El ICCT sitúa en 25 % la mejora representativa para los tipos certificados hacia 2024 [53]. El modelo adopta  $r_{NG} = 25\%$  con penetración lineal desde cero en 2025 hasta el 50 % de la flota en 2050, en línea con las proyecciones de renovación de flota del *Global Market Forecast 2025* de Airbus para América del Sur [4] y con el CMO 2025 de Boeing [97]. Con estas dos palancas actuando de forma aislada, el modelo proyecta emisiones de CO<sub>2</sub> de 11,62 millones de toneladas en 2050, equivalentes a una reducción del 16,44 % frente al BAU.

### **Escenarios combinados: Moderado, Intermedio y Ambicioso**

Los tres escenarios combinados integran simultáneamente las cuatro palancas de mitigación, las cuales son eficiencia de flota, ATM, SAF y nuevas tecnologías, diferenciándose en la intensidad asignada a cada una, según se resume en la Tabla 2.13.

**Escenario Combinado Moderado.** Representa la implementación de las medidas contempladas en el Plan de Acción de Chile ante la OACI en su segunda edición [75], sin compromisos adicionales más allá de los ya asumidos institucionalmente. La mejora de eficiencia de flota se sitúa en 1,5 %/año y la corrección ATM en 3 %, mientras que el SAF alcanza el 50 % de la mezcla en 2050 siguiendo la hoja de ruta nacional. El hidrógeno no penetra en este horizonte, dado que el escenario moderado se acota a tecnologías con hoja de ruta normativa nacional vigente, por lo que hay que considerar la ausencia de una infraestructura chilena de hidrógeno aeronáutico lo cual lo excluye del

Tabla 2.13: Parámetros principales de los escenarios combinados

| Parámetro                               | Moderado | Intermedio | Ambicioso | Fuente                            |
|-----------------------------------------|----------|------------|-----------|-----------------------------------|
| Eficiencia flota $\eta$ ( %/año)        | 1,5      | 2,0        | 2,5       | ICCT 2025 / Plan OACI Chile       |
| Mejora ATM $\delta$ ( %)                | 3        | 8          | 10        | Plan OACI Chile 2025              |
| SAF al 2050 ( %)                        | 50       | 65         | 85        | IATA FNZ / Hoja de ruta SAF Chile |
| Penetración H <sub>2</sub> al 2050 ( %) | 0        | 30         | 50        | Airbus ZEROe / estimación OACI    |
| Penetración nueva gen. al 2050 ( %)     | 30       | 50         | 70        | Airbus GMF 2025 / Boeing CMO 2025 |
| CO <sub>2</sub> proyectado al 2050 (Mt) | 11,23    | 8,43       | 6,59      | —                                 |
| Reducción vs. BAU al 2050 ( %)          | 19,3     | 39,4       | 52,6      | —                                 |

rango factible en este nivel de ambición. Las aeronaves de nueva generación alcanzan el 30 % de penetración al final del horizonte, coherentemente con la tasa de reemplazo de flota proyectada por Airbus para la región [4]. Las emisiones proyectadas de CO<sub>2</sub> son de 11,23 millones de toneladas en 2050, una reducción del 19,3 % frente al BAU, con un CO<sub>2</sub> acumulado evitado de aproximadamente 29,7 millones de toneladas en el período 2024–2050.

**Escenario Combinado Intermedio.** Alineado con el compromiso de la industria aérea global de alcanzar cero emisiones netas de carbono en 2050 (*Fly Net Zero*), adoptado mediante resolución por los miembros de IATA en su 77ª Asamblea General de octubre de 2021 [49]. En este escenario se asumen mandatos regulatorios exigentes, entre los que se cuentan una mejora de eficiencia de 2,0 %/año, una corrección ATM del 8 % por digitalización avanzada del espacio aéreo, una penetración de SAF del 65 % en 2050, la cual es una cota fijada por IATA como necesaria para la trayectoria *net-zero* [49], y una penetración del hidrógeno del 30 % sobre las rutas cortas nacionales a partir de 2035, junto con aeronaves de nueva generación cubriendo el 50 % de la flota. Las proyecciones arrojan 8,43 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en 2050, equivalentes a una reducción del 39,4 % respecto del BAU.

**Escenario Combinado Ambicioso.** Representa la cota técnica superior, diseñado para explorar el máximo potencial de reducción alcanzable antes de 2050 si todos los vectores de mitigación desplegaran al ritmo más acelerado técnicamente factible y con

pleno apoyo de política pública. Se asume una mejora de eficiencia de 2,5 %/año, la digitalización total del espacio aéreo chileno con un beneficio ATM del 10 %, una penetración de SAF del 85 % (con inicio anticipado en 2026 para reflejar un mandato fuerte y acelerado), y una penetración del hidrógeno del 50 % en rutas cortas con aeronaves de nueva generación cubriendo el 70 % de la flota. Bajo estos supuestos, el modelo proyecta emisiones de CO<sub>2</sub> de 6,59 millones de toneladas en 2050, equivalentes a una reducción del 52,6 % frente al BAU, magnitud comparable con los rangos de ambición alta que el ICCT identifica para la aviación global en su *Aviation Vision 2050* [51].

Es importante señalar que la suma aritmética de los efectos de las palancas aisladas no reproduce exactamente el resultado del escenario combinado correspondiente. Las medidas actúan de forma multiplicativa sobre el consumo neto, es decir cada reducción se aplica sobre un consumo ya reducido por la palanca anterior, lo cual genera un solapamiento entre efectos que hace que el combinado sea siempre menor que la suma de los aislados. Esta interacción es intrínseca a la estructura de la Ecuación (2.73) y es consistente con la práctica metodológica habitual en estudios de proyección realizados con enfoque bottom-up [28].

## 2.8. Herramientas Computacionales y Software

La implementación del modelo se realiza utilizando un conjunto integrado de herramientas computacionales de código abierto y comerciales. El lenguaje de programación principal en un comienzo era R y luego se optó por Python, seleccionado por su versatilidad, la disponibilidad de bibliotecas científicas y su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos geoespaciales. Las principales bibliotecas utilizadas incluyen:

- pandas y NumPy: manipulación y procesamiento de datos tabulares y numéricos.
- geopandas y shapely: manejo de datos geoespaciales vectoriales (red vial, puertos, aeropuertos).
- xarray y netCDF4: manejo de datos multidimensionales en formato NetCDF (salidas grilladas).
- matplotlib, cartopy y plotly: visualización de datos y generación de mapas de calor.

- SciPy: funciones estadísticas y simulaciones.

Otra herramienta muy usada para el postprocesamiento de los datos es **QGIS**, la cual es una herramienta perteneciente a los Sistemas de Información Geográfica, este software es de código abierto y es empleado para la visualización de la distribución espacial de emisiones sobre las distintas rutas y redes viales analizadas.

Los datos de entrada se organizan en bases de datos estructuradas (formato CSV y NetCDF) y los resultados se almacenan en archivos NetCDF4 georreferenciados, compatibles con los estándares de la comunidad de modelación atmosférica y con las bases de datos internacionales (EDGAR, CAMS). La infraestructura computacional incluye estaciones de trabajo con procesadores multi-núcleo y almacenamiento adecuado para el procesamiento de los datos trabajados (del orden de gigabytes) y la ejecución de simulaciones.

## 2.9. Validación y Verificación

La validación del modelo de emisiones se aborda desde múltiples perspectivas. La comparación con inventarios nacionales oficiales permite verificar la consistencia de las emisiones totales estimadas con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile (INGEI) [92] y con los resultados de Osses *et al.* [86] y Álamos *et al.* [116]. Por otro lado, también se tiene que la verificación con estadísticas energéticas garantiza que el consumo de combustible implícito en las emisiones estimadas sea consistente con las ventas de combustible reportadas por la SEC, aplicando el factor de ajuste de consumo de combustible cuando sea necesario y pertinente.

La comparación con inventarios globales confronta los resultados con las estimaciones de EDGAR v8.0 [22], CAMS-GLOB-ANT y CEDS para identificar coincidencias y discrepancias, siguiendo la metodología empleada por Osses *et al.* [86]. Asimismo, la comparación con observaciones satelitales permite verificar cualitativamente la distribución espacial de emisiones mediante columnas de NO<sub>2</sub> del instrumento TROPOMI a bordo del satélite Sentinel-5P.

Para las proyecciones al 2050, la validación incluye la comparación con múltiples estudios e investigaciones científicas tanto nacionales como internacionales, incluyendo las trayectorias proyectadas con las evaluaciones independientes del ICCT [52], Climate Analytics [10], el programa Giro Limpio [36], las proyecciones oficiales de la NDC y el informe *Agora Verkehrswende/GIZ* “Towards Decarbonising Transport: Chile 2025” [2],

entre otros. La consistencia interna del modelo se verifica rigurosamente mediante comprobaciones de balance de masa y energía, análisis de sensibilidad a los parámetros clave y evaluación de la convergencia de las simulaciones.

### 3. Emisiones y Desagregación Espacial

Empleando la metodología anteriormente descrita, se presentan en este capítulo los resultados obtenidos de los modelos espaciales realizados reflejados en primera instancia en el cálculo y estimación precisa de emisiones y luego en su respectiva desagregación espacial del transporte multimodal chileno, en donde se incluyen los 3 modos de transporte trabajados y analizados durante esta investigación. A lo largo del capítulo se discuten y contrastan los resultados con la literatura existente, inventarios nacionales e internacionales, y con las metas climáticas comprometidas por Chile.

#### 3.1. Transporte Terrestre

A continuación, y comenzando con el transporte terrestre, es que se presenta un análisis detallado de las emisiones de los principales contaminantes estudiados, desglosando la información pasando por sus niveles regionales, provinciales y su desagregación espacial de alta resolución.

Como se ha mencionado anteriormente, para establecer una línea base sólida que permita analizar las emisiones del sector transporte completamente, resulta fundamental comprender la distribución espacial de los gases de efecto invernadero y contaminantes locales en el escenario actual. Comenzando con el gas de efecto invernadero principal, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) representa el mayor volumen de estas emisiones a nivel nacional, y su desagregación territorial ofrece una primera aproximación empírica a las zonas con mayor intensidad vehicular y consumo de combustibles fósiles. El análisis regionalizado de este contaminante es una primera aproximación de su distribución espacial. Si bien se presenta este análisis regional para  $CO_2$ , cabe destacar que los modelos generados permiten realizar este análisis para todos los contaminantes de interés.

La figura 3.1 ilustra la distribución de estas emisiones. Notoriamente, la Región Metropolitana de Santiago concentra casi un tercio del total nacional con un 30.7 %. Este fenómeno responde de manera directa a la alta densidad poblacional y al consecuente tamaño del parque automotriz que circula diariamente en la capital. Como se observa en la figura, le siguen las regiones de Valparaíso (9.2 %) y Biobío (8.3 %), zonas que

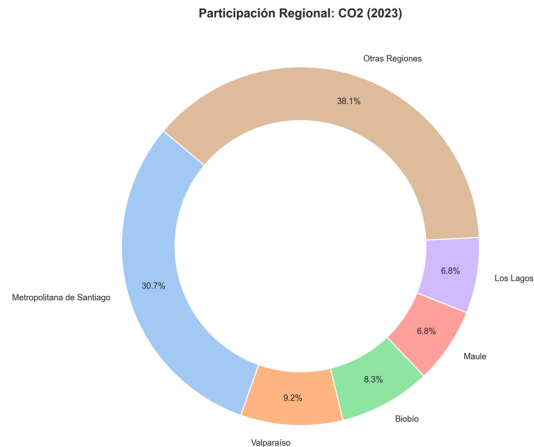


Figura 3.1: Participación porcentual de las emisiones de  $CO_2$  por región para el año 2023.

no solo albergan importantes núcleos urbanos, sino también los principales puertos y corredores logísticos del país, lo que consecuentemente atrae un alto flujo de vehículos de carga pesada. El 38.1 % restante se diluye entre las demás regiones. Esto subraya un patrón de centralización evidente en la generación de  $CO_2$  derivado del transporte, un factor crítico a considerar al momento de diseñar políticas de descarbonización focalizadas como se analizará más adelante.

Por otro lado, más allá de los gases de efecto invernadero, la evaluación de contaminantes locales es un eje central de esta investigación. El material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) tiene implicancias directas y severas sobre la salud pública, por lo que cuantificar su emisión a nivel regional permite identificar los focos críticos donde la calidad del aire se ve mayormente comprometida por la combustión en motores, especialmente aquellos que operan con ciclo diésel.

Al observar los resultados expuestos en la figura 3.2, la Región Metropolitana (R13) nuevamente vuelve a posicionarse como la principal fuente emisora, aproximándose a los 0.5 Gg/año. La brecha respecto a las demás regiones es sustancial y refleja la magnitud de los desplazamientos urbanos. Sin embargo, el orden de las regiones que le siguen presenta matices interesantes. La Región del Biobío (R08) y la Región de Antofagasta (R02) ocupan el segundo y tercer lugar, superando los 0.15 Gg/año. Este comportamiento difiere de la distribución proporcional del  $CO_2$ . La alta posición de Antofagasta, por ejemplo, sugiere que la composición de la flota, el tipo de combustible



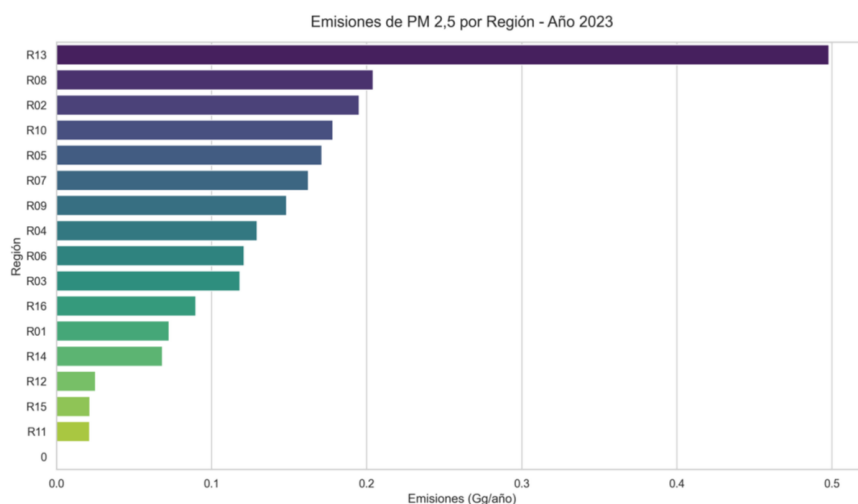


Figura 3.2: Emisiones totales de material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ) por región durante el año 2023, expresadas en Gg/año.

predominante asociado a la actividad minera e industrial, y la edad del parque automotriz tienen un impacto fuertemente diferenciado en la emisión de material particulado. En contraste con esto, las regiones extremas como Aysén (R11) y Magallanes (R12) presentan las emisiones más bajas del registro, lo cual es coherente con su menor volumen de tráfico vehicular y densidad demográfica. Para llevar estos resultados del modelo macroscópico a una resolución espacial más fina y representativa, el siguiente paso metodológico exige realizar una desagregación de las emisiones a nivel provincial, lo cual también está implementado en los modelos generados.

Como etapa previa y condicionante para este escalamiento territorial, se ha llevado a cabo un estudio de la distribución demográfica a lo largo del país. El objetivo de este análisis es evaluar la cantidad de habitantes por provincia como un factor de ponderación, bajo la premisa mencionada anteriormente en metodología en donde se plantea que el volumen poblacional actúa como un *proxy* directo de la demanda de movilidad, la densidad del parque automotriz y el flujo logístico asociado a cada zona.

Al examinar las cifras demográficas absolutas, la asimetría territorial chilena se hace evidente de forma inmediata. Como se observa en la figura 3.3, la provincia de Santiago concentra una fracción desproporcionada de la población nacional, superando ampliamente la barrera de los 5.3 millones de habitantes. Esta magnitud eclipsa a los demás polos urbanos del país. Núcleos de gran importancia industrial y habitacional como Concepción (1.025.448 habitantes), Cautín (803.777) y Valparaíso (757.176) la

siguen en la lista, pero con una brecha de millones de residentes de diferencia. Esta jerarquía es un indicador directo para prever dónde se localizará la mayor presión sobre la infraestructura de transporte y, por consiguiente, el grueso de la carga de emisiones vehiculares.

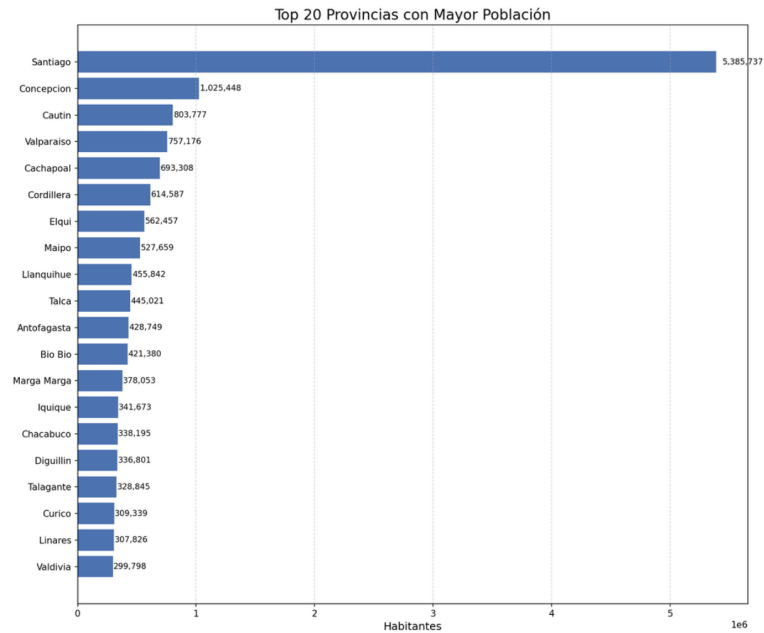


Figura 3.3: Top 20 de provincias con mayor cantidad de habitantes. Se evidencia la macrocefalia demográfica de la provincia de Santiago respecto al resto del país.

Para dimensionar geográficamente este fenómeno y observar cómo interactúan las provincias vecinas, se han generado mapas de calor que espacializan la carga demográfica. La figura 3.4 expone dos enfoques complementarios realizados para esta variable. A la izquierda, la categorización por rangos fijos ilustra de manera contundente la concentración poblacional en la zona central y la dispersión casi absoluta en los extremos norte y sur del territorio.

Sin embargo, debido al efecto atípico que genera la capital en cualquier representación lineal o de rangos simples, se aplicó también una transformación a escala logarítmica (visible a la derecha). Este tratamiento de los datos es clave, ya que permite atenuar las enormes diferencias de magnitud y revela con mayor sensibilidad las variaciones de densidad demográfica en provincias intermedias y zonas de menor urbanización que de otro modo quedarían invisibilizadas.

La validación de este factor poblacional construye las bases para calcular los coeficientes de distribución que se aplicarán posteriormente a los inventarios regionales de

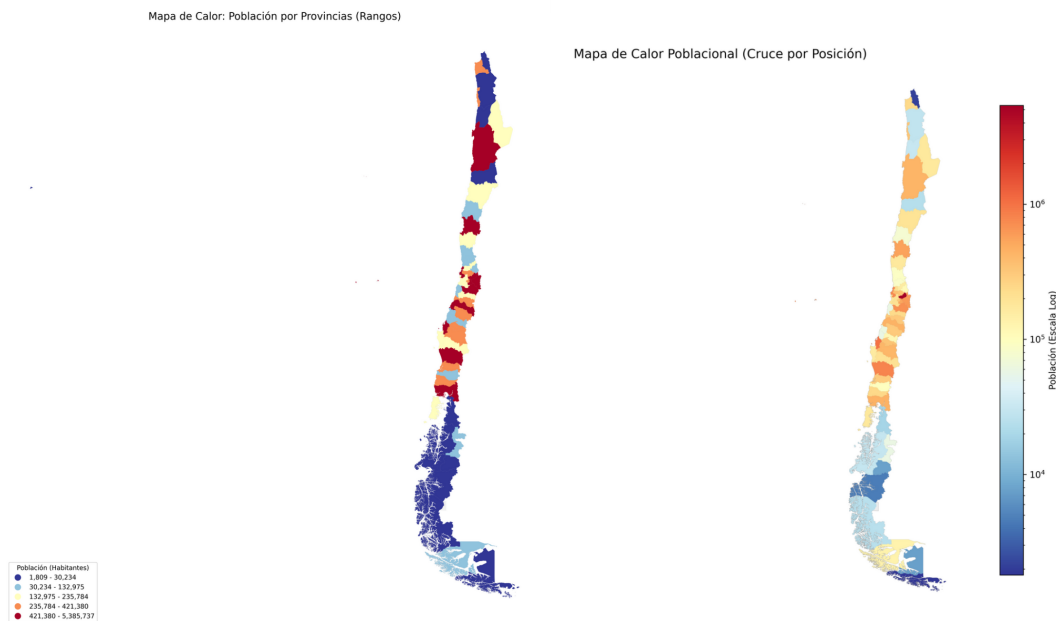


Figura 3.4: Mapas de calor de la distribución poblacional a nivel provincial. Izquierda: Clasificación mediante segmentación por rangos. Derecha: Distribución visualizada utilizando una escala logarítmica para atenuar los valores atípicos del centro del país.

contaminantes en los modelos programados. De esta forma, se asegura que el escalamiento de los datos refleje de manera empírica las "zonas de sacrificio ambiental" los requerimientos reales de mitigación a nivel local. Una vez establecido este factor de ponderación demográfico, corresponde comparar y contrastar esta variable espacial con los volúmenes reales de emisiones calculados por el modelo bottom-up. Los resultados a nivel provincial para los principales gases de estudio, en donde se presenta el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como eje del calentamiento global y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) como contaminantes locales críticos, al igual que las emisiones de material particulado, revelan un panorama de profunda asimetría territorial que no siempre responde de forma lineal a la cantidad de habitantes.

Al analizar el consumo de combustible fósil traducido en  $CO_2$ , se observa que la provincia de Santiago monopoliza el inventario nacional. Como ilustra la figura 3.5, esta provincia supera ampliamente la barrera de los 6.000 Gg/año. Esta magnitud empuja los aportes de las provincias que le siguen en el ordenamiento nacional, tales como Concepción y Cautín, las cuales rondan los 1.500 Gg/año. La gráfica de desglose por regiones reafirma este fenómeno, ya que la barra correspondiente a la Región Metropolitana (R13) está dominada casi en su totalidad por la provincia de

Santiago, invisibilizando en términos proporcionales el aporte de polos periféricos como Cordillera o Maipo.

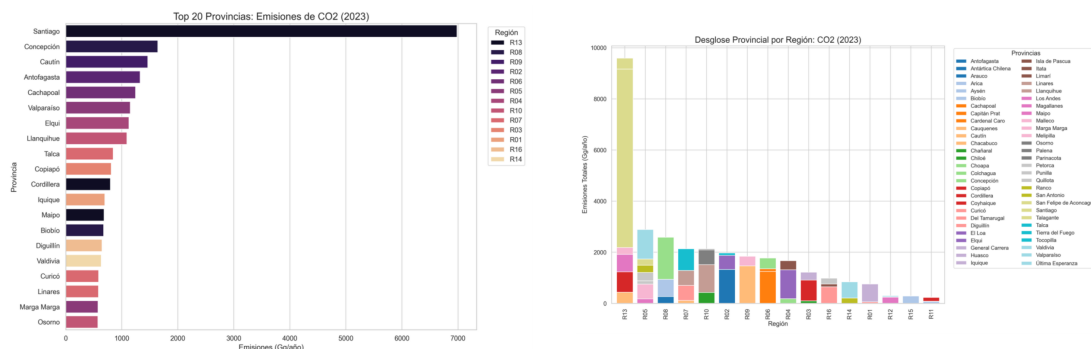


Figura 3.5: Emisiones provinciales de  $CO_2$  durante 2023. Izquierda: Ranking de las 20 provincias con mayor volumen de emisión. Derecha: Desglose de la contribución provincial al interior de cada macrozona regional.

Sin embargo, el comportamiento espacial de los óxidos de nitrógeno introduce matices operativos sutiles para la investigación, pero que de todas maneras hay que tener presente. Si bien Santiago mantiene el liderato nacional rozando los 20 Gg/año, la brecha relativa con el resto de las provincias se estrecha. El caso más destacado es el de la provincia de Antofagasta, que experimenta un salto cuantitativo hasta el segundo puesto del país, equiparándose a una zona de alta densidad urbana como Concepción (figura 3.6).

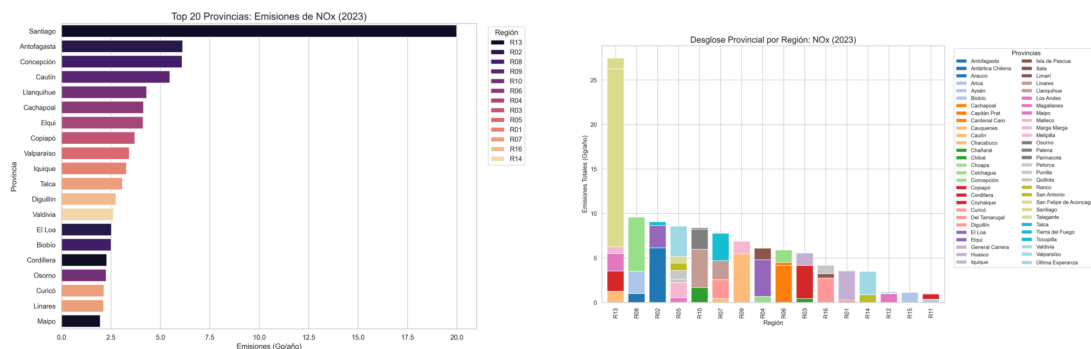


Figura 3.6: Emisiones provinciales de  $NO_x$  en 2023. Izquierda: Las 20 provincias más emisoras. Derecha: Distribución interna de las emisiones nitrogenadas por región.

Este cambio de jerarquía entre contaminantes se explica por la matriz tecnológica de la flota nortea. A diferencia del parque automotriz de la capital, fuertemente inclinado hacia los vehículos livianos de ciclo Otto (gasolina), Antofagasta presenta una

alta prevalencia de vehículos pesados y maquinaria con motores diésel, estrechamente vinculados al transporte logístico y la actividad minera. Estos motores operan bajo exigentes condiciones de carga térmica, lo que los hace inherentemente más propensos a la generación de  $NO_x$ . Esta dualidad demuestra que no basta con evaluar el volumen de habitantes para comprender el impacto ambiental del transporte en Chile. Mientras el  $CO_2$  traza una curva casi directamente proporcional con la densidad demográfica, los contaminantes locales exigen incorporar al diseño de políticas públicas la vocación productiva y el tipo de combustible predominante en cada territorio.

El tránsito de una escala provincial a una grilla de alta resolución exige la definición de variables subrogantes, comúnmente denominadas *proxies* espaciales, los cuales fueron definidos y explicados en el capítulo anterior. Recordemos que estos parámetros permiten distribuir los inventarios agregados sobre el territorio, asignando un peso geográfico a cada celda de la malla matemática en función de la infraestructura vial, los flujos de tráfico y los patrones de asentamiento humano.

Para abordar la complejidad geomorfológica y vial del país, se estructuraron dos tipologías de distribución: una enfocada en la red de conectividad a larga distancia (proxy interurbano) y otra calibrada exclusivamente para la movilidad dentro de las ciudades (proxy urbano).

El modelado del comportamiento interurbano a lo largo del territorio nacional queda plasmado en la figura 3.7. La aplicación de una transformación logarítmica a los pesos ponderados resulta fundamental para lograr una correcta visualización, ya que sin este ajuste matemático, la saturación en la macrozona central volvería imperceptibles las rutas estructurantes del norte y sur extremo. El mapa revela con precisión la espina dorsal del transporte de carga y pasajeros en Chile, siguiendo de cerca el trazado de la Ruta 5 y sus ramificaciones hacia los puertos y centros mineros. Al realizar un acercamiento a la Región Metropolitana y sus provincias circundantes, las diferencias entre las dinámicas de desplazamiento se vuelven notables. La figura 3.8 contrasta los dos enfoques espaciales generados.

Por un lado, el proxy interurbano (izquierda) dibuja un tejido denso y marcado que permea los límites regionales. Captura los anillos periféricos, las rutas de acceso a los valles interiores y los corredores logísticos hacia la costa. En contraparte, el proxy urbano (derecha) exhibe un comportamiento insular. El peso ponderado se aglutina violentamente en el polígono central del Gran Santiago, formando un núcleo rojo de máxima intensidad que decrece de manera abrupta hacia la periferia, apareciendo únicamente en manchas menores que coinciden con localidades como Rancagua, Melipilla

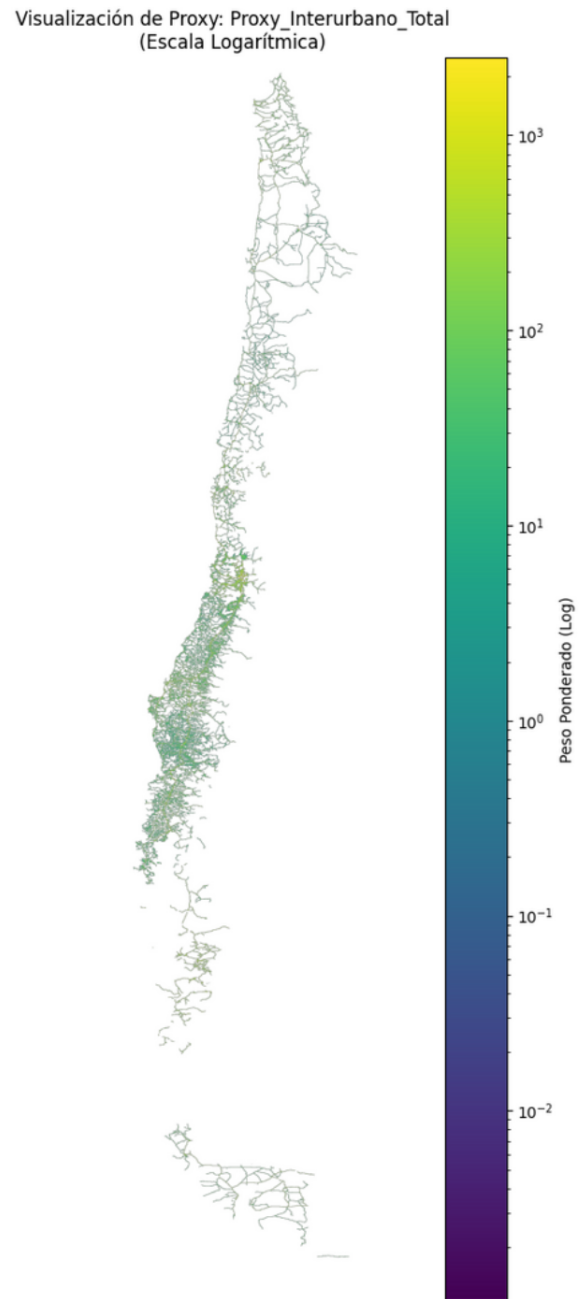


Figura 3.7: Visualización a escala nacional del proxy interurbano total. La paleta de colores en escala logarítmica resalta la conectividad longitudinal del país y atenúa la hiperconcentración de la zona central.

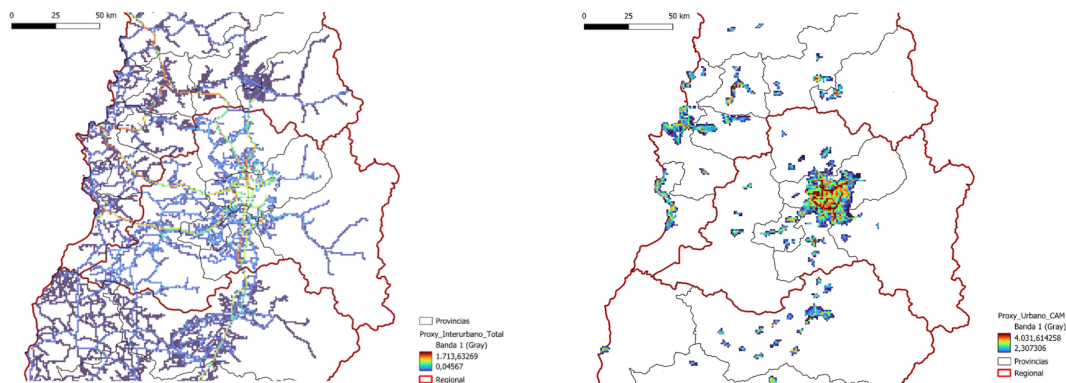


Figura 3.8: Distribución de ponderadores espaciales en la zona central. Izquierda: Proxy interurbano, evidenciando la red de autopistas y rutas periféricas. Derecha: Proxy urbano, caracterizado por una alta densidad recluida en el núcleo del Gran Santiago y capitales provinciales.

o Los Andes.

La conjugación del inventario provincial con estos factores de distribución materializa finalmente los mapas de emisiones en alta resolución espacial, con celdas de 1 kilómetro cuadrado aproximadamente. Este proceso de asignación celda a celda es el núcleo del escalamiento espacial del modelo.

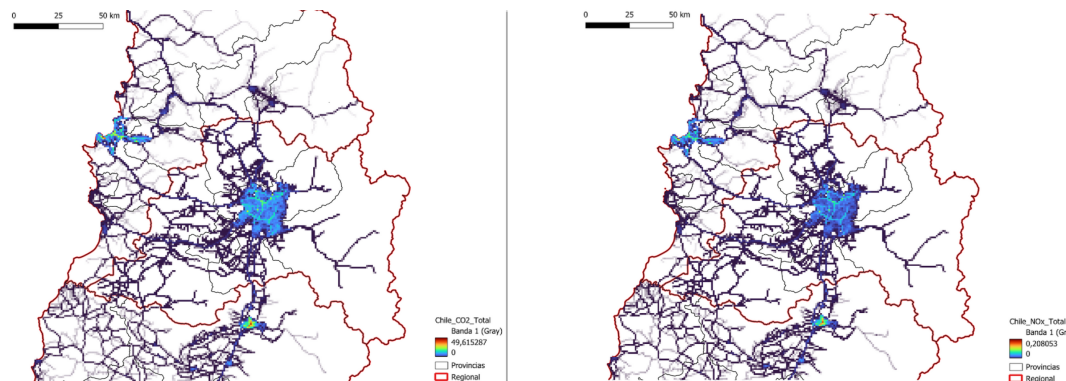


Figura 3.9: Grillas de alta resolución para la Región Metropolitana y alrededores (2023). Izquierda: Emisiones totales de  $CO_2$ . Derecha: Emisiones totales de  $NO_x$ .

Al contrastar la huella geográfica del  $CO_2$  frente a los  $NO_x$  (figura 3.9), surgen patrones que validan la física del problema y la correcta selección de los proxies. La concentración de dióxido de carbono domina el radio urbano. La mancha azul y verde intenso calca casi a la perfección el proxy urbano de Santiago, demostrando que el volumen de vehículos livianos atrapados es el principal responsable del consumo neto de combustible. En cuanto a los óxidos de nitrógeno, estos siguen un comportamiento

muy similar aunque trazan un esqueleto algo más marcado sobre las vías interurbanas. Aunque el núcleo de la capital sigue siendo el punto más opaco del mapa, las líneas de emisión que conectan Santiago con el norte y sur (Ruta 5) así como hacia el oeste (Ruta 68 y 78) mantienen una intensidad proporcionalmente mayor a la del  $CO_2$ . Esto obedece a la predominancia del tráfico de vehículos pesados en estos ejes. Los motores diésel de gran cilindrada, operando a velocidades de carretera bajo cargas sostenidas, elevan drásticamente la temperatura de la cámara de combustión, favoreciendo la oxidación térmica del nitrógeno atmosférico. Esta diferenciación visual confirma que el modelo logra capturar la heterogeneidad tecnológica de la flota según su entorno de operación.

Como se ha mencionado anteriormente, la construcción de un inventario de emisiones de alta fidelidad no culmina con la simple recolección volumétrica de los datos base, sino que el verdadero escollo técnico reside en cómo esa información se proyecta sobre la cartografía real. Para evitar una asignación plana o estadísticamente distorsionada de la carga vehicular, la arquitectura computacional del modelo terrestre, la cual recordemos que fue desarrollada íntegramente mediante rutinas de programación en Python, fue sometida a un riguroso proceso de calibración iterativa. El propósito de esta fase fue obligar al algoritmo a reconocer la heterogeneidad intrínseca del territorio. A nivel de cálculo, no sirve de mucho saber cuántas toneladas emite una provincia si no se puede determinar si esa pluma contaminante nace en una autopista interurbana de alta velocidad o en un cruce urbano saturado. Para resolver esta brecha, el código fue estructurado para asimilar progresivamente factores de ponderación geográfica, ajustando las trazas de actividad según el peso específico de cada provincia y comuna.

La Figura 3.10 documenta el impacto visual y cuantitativo de estos ajustes. En el costado derecho del panel se exponen las pruebas de sensibilidad del código, ya que al comparar una grilla que carece de factor comunal frente a iteraciones donde este parámetro se fuerza al 50 % y al 100 %, salta a la vista la reconfiguración geométrica de las emisiones.

Este proceso fue un ajuste fundamental ya que el código que se tenía inicialmente en el lenguaje computacional R tenía varias fallas y errores lógicos de programación y de la correcta asignación del peso ponderado a las celdas respectivas. Someter al código a esta interacción y llevarlo a este extremo de precisión analítica no responde a un mero perfeccionismo gráfico, sino a una exigencia metodológica necesaria para cuantificar precisamente los contaminantes asociados a cada grilla espacial. Estas matrices espaciales constituyen el pilar fundamental que alimentará posteriormente a los simuladores de química atmosférica tridimensional. Para que un modelo de dispersión logre predecir



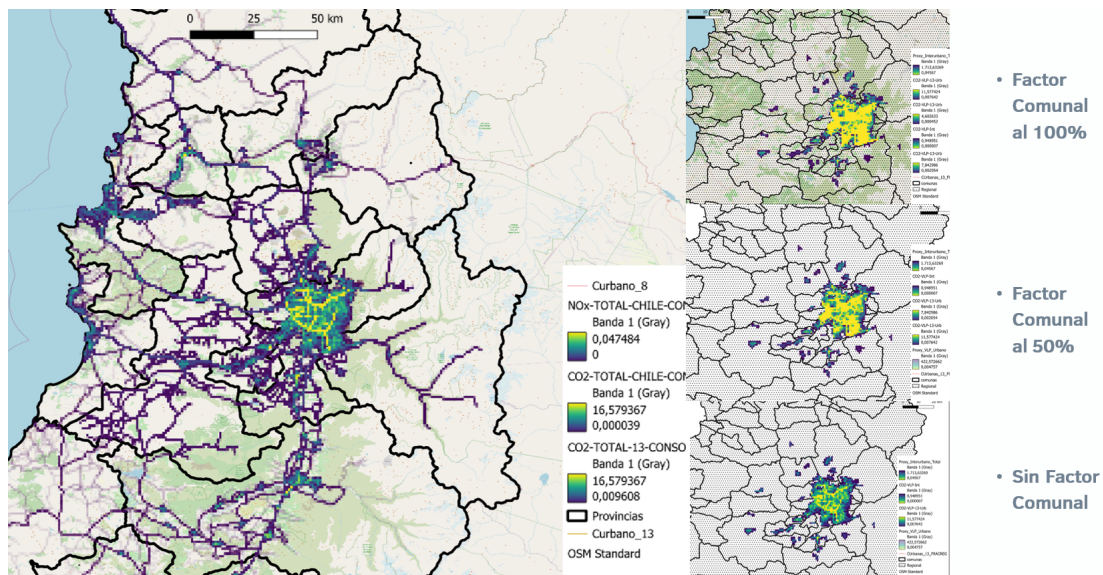


Figura 3.10: Proceso de optimización algorítmica del modelo de desagregación espacial. Los recuadros ilustran cómo la integración de factores de ponderación comunal repercute sustancialmente en la resolución de la grilla hasta capturar con exactitud la topología vial.

cómo se comportará la pluma de esmog, cómo reaccionará con la radiación solar o hacia qué barrios será arrastrada por los vientos predominantes, necesita imperiosamente que las emisiones primarias le sean entregadas con coordenadas precisas. La robustez de este motor de desagregación espacial garantiza, precisamente, que el análisis posterior sobre la calidad del aire local cuente con un cimiento de validez científica indiscutible. Esto es de vital importancia y para comprender la huella espacial de los contaminantes, es importante en primer lugar entender que esto resuelve la problemática a nivel geográfico. Para calibrar los escenarios futuros del modelo bottom-up y formular lineamientos efectivos de mitigación como se hará más adelante, resulta necesario diseccionar el inventario e identificar qué componentes del parque automotriz son los responsables de estas emisiones. Con este propósito, los resultados se han estratificado en cinco macrocategorías vehiculares: buses (BUS), camiones (CAM), motocicletas (MOT), taxis (TAX) y vehículos livianos de pasajeros (VLP).

A su vez, esta estratificación se cruza con el ámbito de operación (urbano e interurbano), lo que permite trazar una matriz de intensidad que revela las abismales diferencias tecnológicas y operacionales que coexisten en el territorio nacional. Por otro lado, el comportamiento termodinámico que propicia la formación de óxidos de nitrógeno está fuertemente ligado a los motores de ciclo diésel operando bajo altas

cargas. Esta particularidad física se refleja de manera transparente al proyectar los datos en una matriz bidimensional de intensidad regional.

Al observar la figura 3.11, destaca de inmediato que la Región Metropolitana (R13) aglomera los valores absolutos más altos, repartiendo su impacto entre camiones y vehículos livianos. Sin embargo, el fenómeno más complejo para la política pública ocurre en el resto del país. En zonas con fuerte vocación extractiva, forestal e industrial, como Antofagasta (R2) y Biobío (R8), la categoría de camiones absorbe la casi totalidad de la carga de emisiones de la región. Las altas temperaturas de combustión generadas por el transporte de carga pesada en topografías exigentes transforman a estas rutas interurbanas en los principales focos de  $NO_x$  a nivel nacional.

El cruce de la composición sectorial con el ámbito espacial (figuras 3.12 y 3.13) cuantifica este efecto. Fuera del Gran Santiago, las barras correspondientes al transporte de carga interurbano (CAM\_Int) dominan los gráficos. En contraste, dentro de la capital (R13), la tremenda congestión vehicular obliga al parque automotriz liviano (denominado VLP\_Urb) a operar en ciclos transitorios continuos, plagados de aceleraciones y frenadas bruscas lógicamente. Este patrón operativo ineficiente dispara las emisiones de  $NO_x$  en los motores de encendido por chispa, igualando y superando la magnitud térmica del transporte logístico urbano.

Al trasladar la evaluación hacia los gases de efecto invernadero, la morfología del problema cambia de forma sustancial. La generación de dióxido de carbono mantiene una relación estequiométrica directa con el consumo de combustible, haciendo que la densidad vehicular juegue un rol mucho más protagónico que la tecnología específica del motor.

La lectura de la matriz de  $CO_2$  (figura 3.14) es contundente. Una sola celda satura por completo la escala térmica del país: los vehículos livianos de la Región Metropolitana. Con un registro que sobrepasa los 6.500 Gg anuales, el uso del automóvil particular en la capital empequeñece al resto del inventario. Las demás regiones muestran aportes mucho más tenues y equilibrados, donde camiones y autos privados comparten una fracción menor de la quema de combustibles fósiles.

Los gráficos de apilamiento y detalle (figuras 3.15 y 3.16) materializan el verdadero desafío para la meta de carbono neutralidad a 2050. Se tiene que, en cuanto a la abrumadora columna gris en el balance de la R13, ésta confirma que la dependencia de la movilidad urbana privada es el motor del cambio climático dentro del sector transporte nacional. Esta dualidad de resultados define las reglas para la proyección del modelo, ya que mientras que los índices de calidad del aire local requerirán una profunda renovación

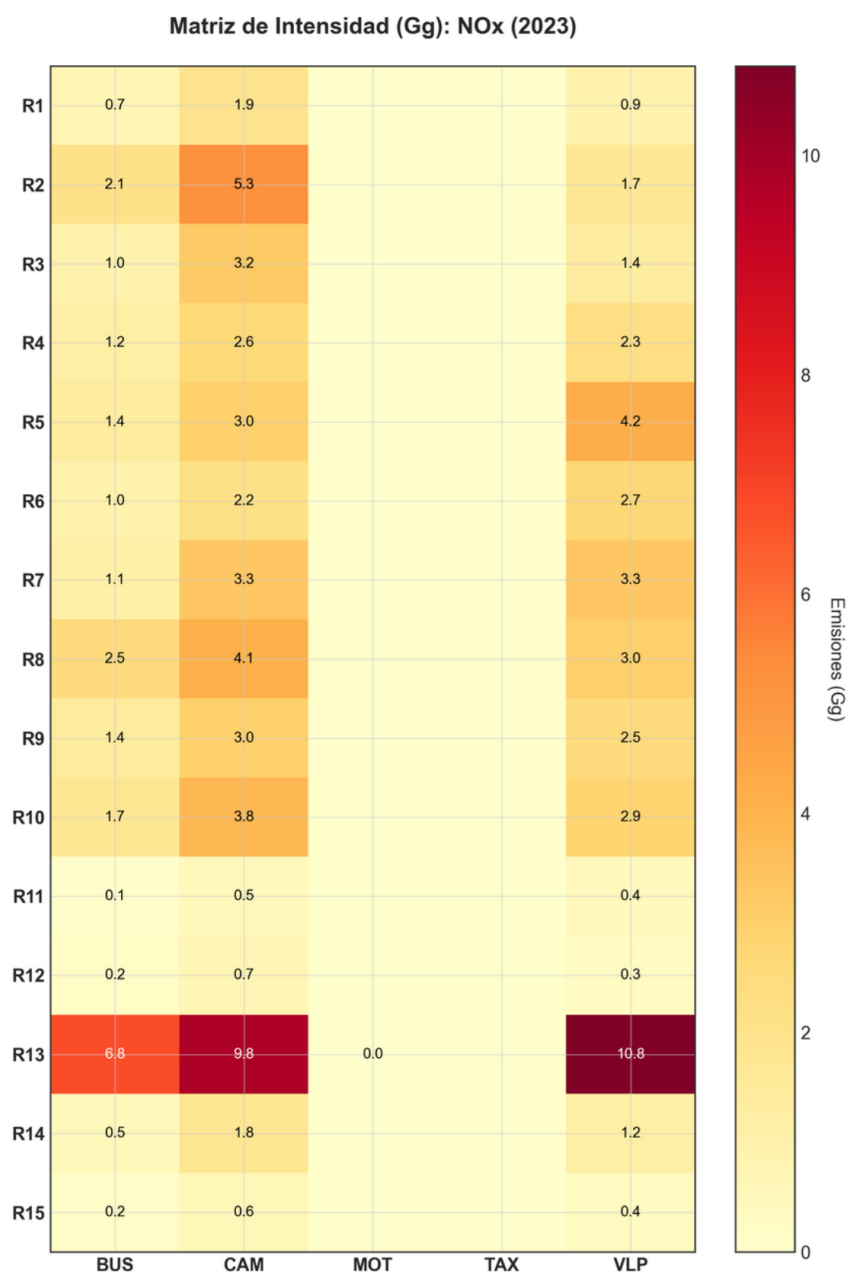


Figura 3.11: Matriz de intensidad regional para emisiones de  $NO_x$  (2023). Las tonalidades oscuras advierten sobre la criticidad del transporte pesado (CAM) y los vehículos livianos (VLP) en zonas específicas.

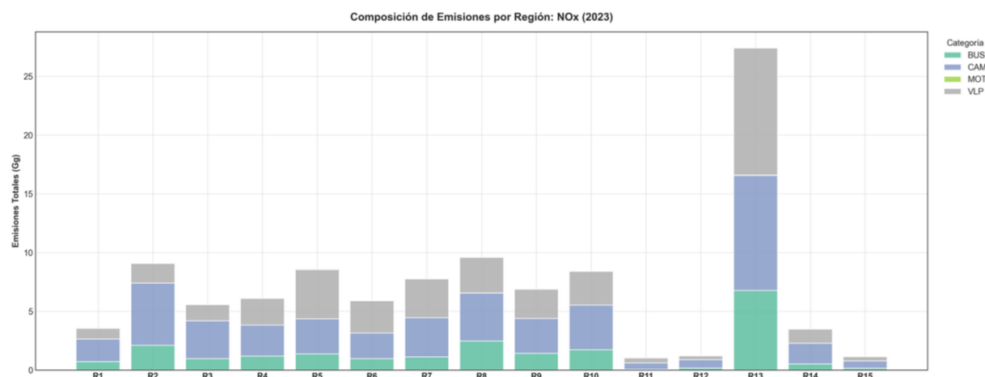


Figura 3.12: Composición proporcional de las emisiones de  $NO_x$  por categoría vehicular. Se constata la predominancia del transporte de carga en la matriz extra-capitalina.

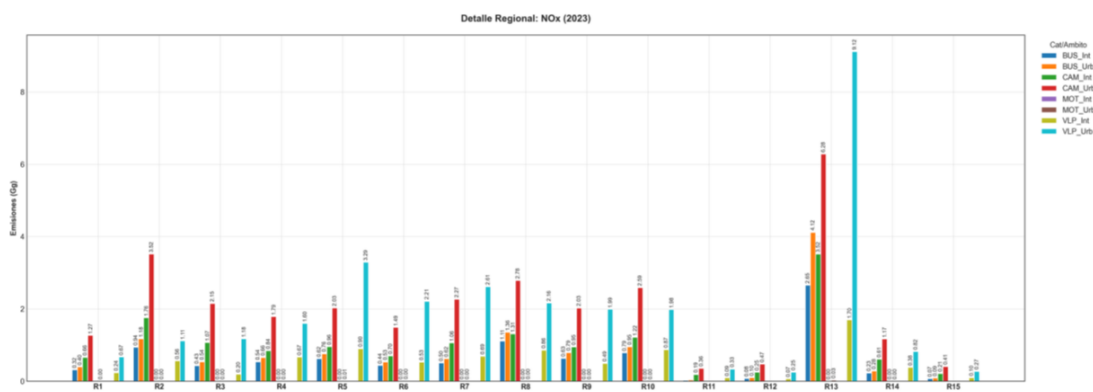


Figura 3.13: Desglose de emisiones de  $NO_x$  discriminando por ámbito operativo (urbano e interurbano). La tracción de carga interurbana y la movilidad urbana particular definen el inventario.

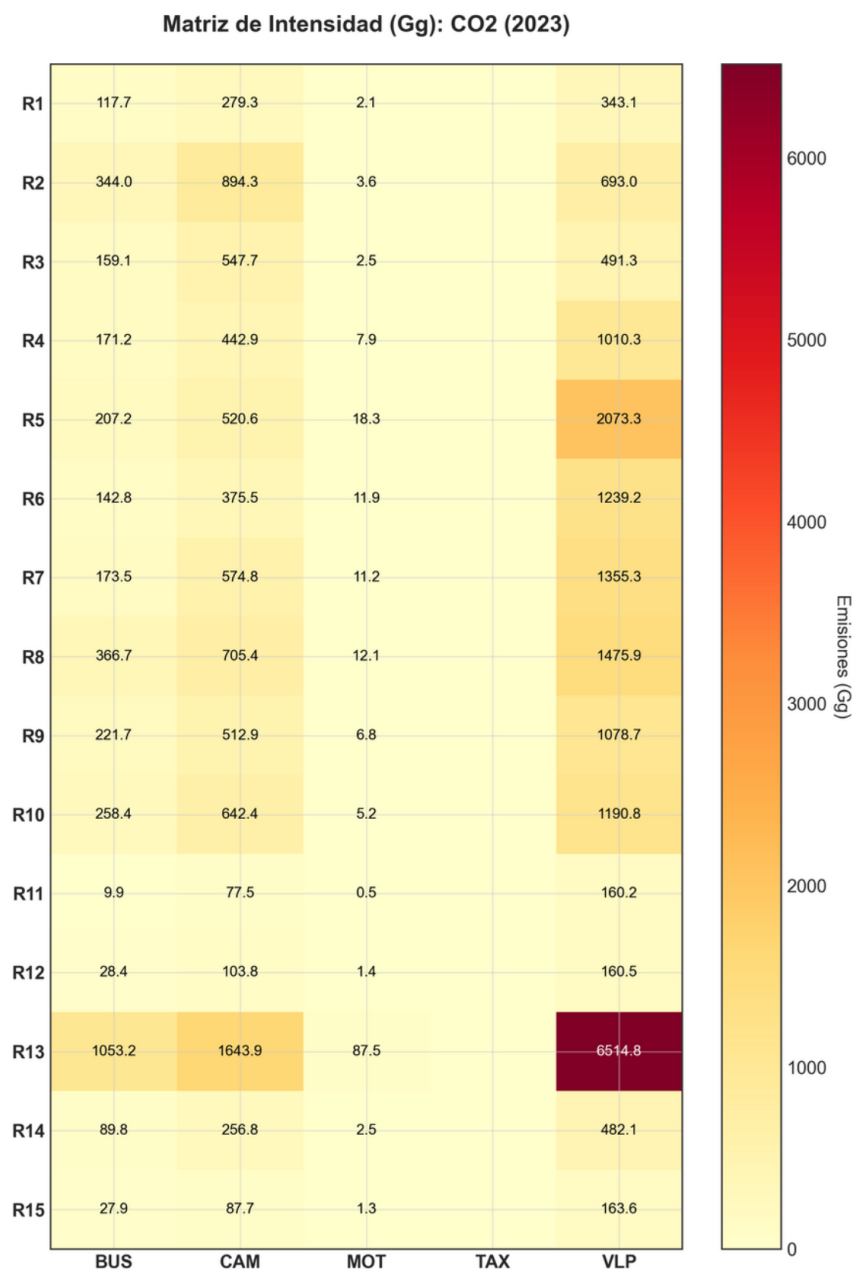


Figura 3.14: Matriz de intensidad regional para la huella de carbono del transporte (2023). Se exhibe una hiperconcentración extrema en los vehículos livianos de la capital.

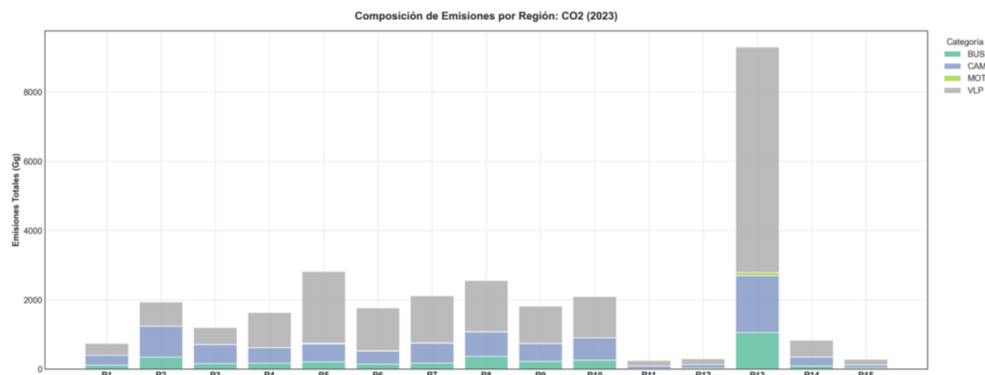


Figura 3.15: Distribución sectorial de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La abrumadora contribución del parque liviano (VLP) en la R13 dictamina el comportamiento del inventario global.

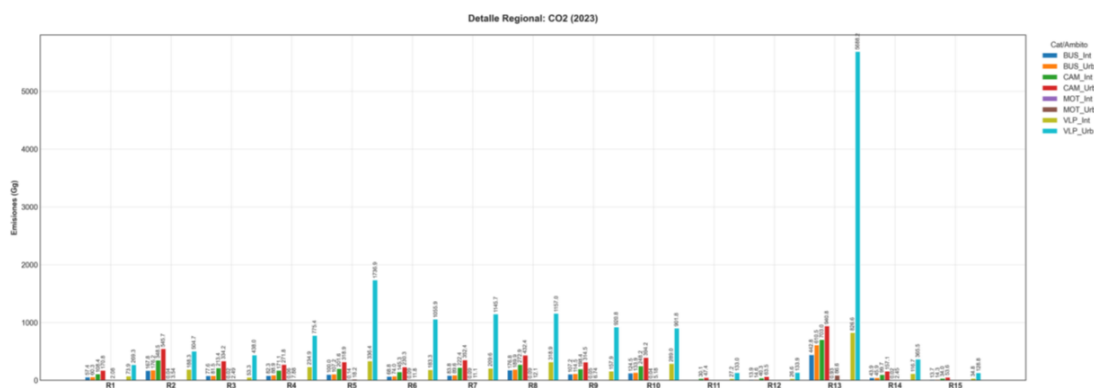


Figura 3.16: Emisiones de dióxido de carbono por ámbito y tipología.

tecnológica y logística del transporte de carga pesado en carreteras, la descarbonización profunda exigirá inevitablemente una contención del uso del vehículo particular y una transición acelerada hacia la electromovilidad en los centros urbanos densamente poblados.

Para profundizar en la dinámica de las emisiones intraurbanas, no basta con identificar los volúmenes totales o las zonas de mayor concentración general, sino que resulta estrictamente necesario localizar las áreas de influencia directa de cada segmento del parque automotriz. Con este propósito metodológico, los modelos desarrollados permiten generar mapas de calor diferenciales. Esta técnica cartográfica de alta resolución consiste en sustraer los valores de emisión espacializados de una categoría respecto a otra celda a celda. El resultado es una superficie matemática donde el gradiente de colores muestra la predominancia absoluta de una fuente móvil sobre otra en cada calle o intersección. El estudio de estas diferencias se realizó para diferentes contaminantes, y se presenta para la fracción de material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) dentro de la Región Metropolitana (R13). La elección de este contaminante y territorio responde a la urgencia sanitaria que impone la calidad del aire en la capital, permitiendo visualizar qué tipo de categoría vehicular es el responsable directo de la contaminación a nivel de barrio.

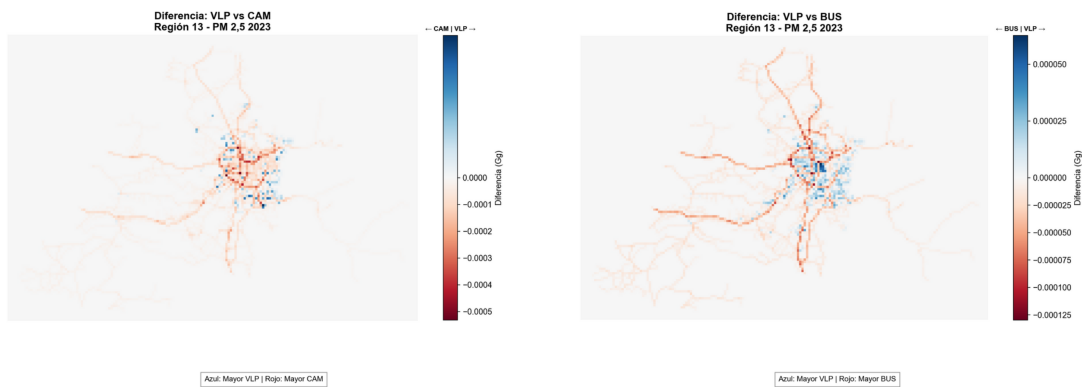


Figura 3.17: Mapas de calor diferenciales para emisiones de  $PM_{2.5}$  en la Región Metropolitana (2023). Izquierda: Contraste entre vehículos livianos (VLP) y camiones (CAM), donde el rojo marca la supremacía del transporte de carga. Derecha: Contraste entre VLP y buses (BUS), evidenciando un núcleo azul dominado por automóviles y corredores rojizos de transporte público.

Al analizar la cartografía y análisis espacial diferencial entre vehículos livianos de pasajeros (VLP) y camiones (CAM), expuesta a la izquierda de la figura 3.17, el tramado vial estructurante se tiñe de un rojo intenso. Esta coloración revela un hecho

crítico, y es que el transporte de carga domina de forma abrumadora la generación de material particulado a lo largo de las autopistas urbanas, accesos interprovinciales y el anillo periférico. Aunque los automóviles particulares superan en varios órdenes de magnitud la cantidad de camiones circulantes, la naturaleza de la combustión diésel bajo carga pesada impone una huella ambiental significativamente superior por kilómetro recorrido. Las escasas celdas azules, donde el impacto del VLP logra sobreponerse, quedan relegadas a paños netamente residenciales o zonas céntricas. En cuanto a la confrontación espacial entre el parque liviano y los buses urbanos (BUS), esta expone una configuración territorial similar pero no igual. Como se observa en la gráfica de la derecha, surge un núcleo fuertemente azul en el centro geográfico e histórico de la capital. Esta aglomeración indica que la extrema densidad de automóviles particulares trancados en la congestión genera un volumen de  $PM_{2,5}$  que opaca las emisiones del transporte público en dicho sector. Este fenómeno no solo se explica por la cantidad de autos, sino también por el impacto positivo de la renovación tecnológica del sistema RED, el cual ha integrado flotas eléctricas y motores de estándar Euro VI en los recorridos céntricos. Sin embargo y como se puede observar, el mapa también delata la capilaridad del transporte público a combustión. Las grandes arterias radiales que conectan el centro neurálgico con las comunas periféricas se marcan con una clara traza roja, señalando los corredores exclusivos y vías troncales donde la frecuencia y operación continua de los buses sigue siendo la fuente predominante de material particulado que respira la población aledaña.

### **3.1.1. Versatilidad Analítica a Escala Local**

Un aspecto fundamental del trabajo desarrollado recae en la capacidad de aterrizar los resultados macroscópicos a una realidad puramente local o a algún sector geográfico de interés, como alguna región, ciudad, provincia, comuna, localidad, etc. Las normativas de mitigación ambiental y los proyectos de intervención urbana rara vez se aplican de manera homogénea sobre vastos territorios, por el contrario, exigen una focalización geográfica sumamente quirúrgica. Es precisamente en este sentido donde el modelo propuesto demuestra su mayor versatilidad operativa, ya que le permite y entrega al usuario la libertad de aislar y desagregar el inventario de emisiones terrestres hasta el nivel comunal, o incluso segmentarlo por cuadrantes específicos de interés. Para evidenciar esta flexibilidad de la arquitectura de datos generada y configurada, la Figura 3.18 proyecta la distribución espacial de las cargas contaminantes sobre la geografía



de la zona central de Chile y en comunas específicas. Esta representación cartográfica supera la comunicación de las tablas tradicionales, ya que mediante la intensidad de los pixeles permite localizar a simple vista dónde se están produciendo los estrangulamientos vehiculares, mapeando con rigor los corredores logísticos más estresados y las tramas urbanas que concentran la mayor fricción de transporte.

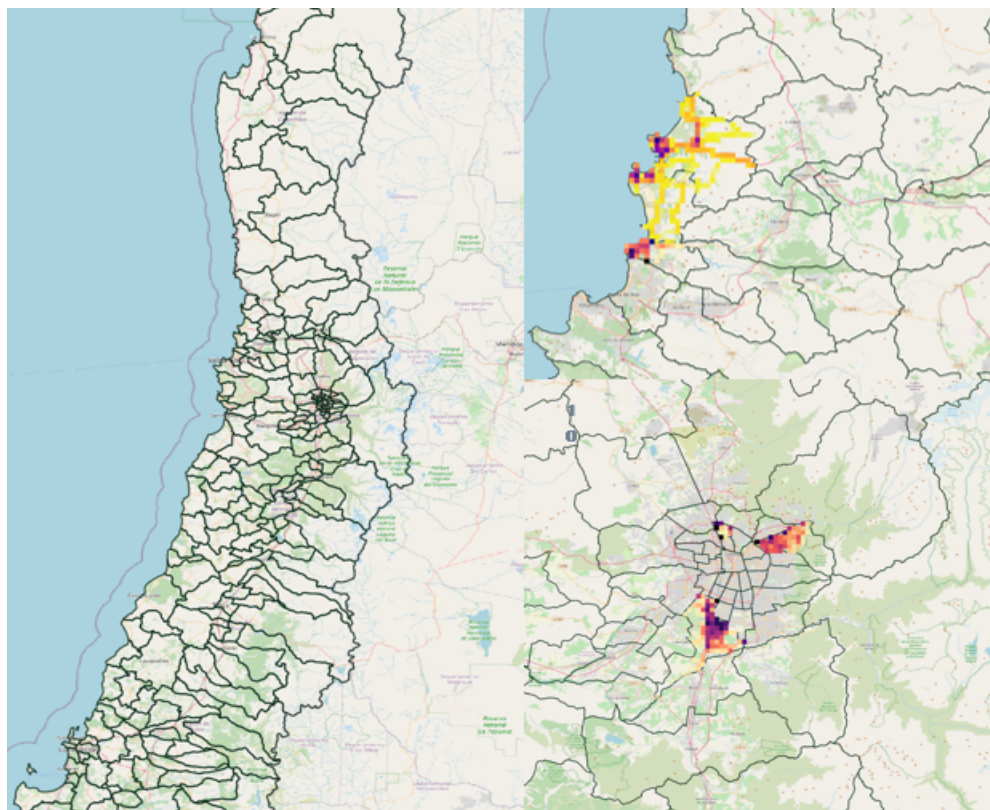


Figura 3.18: Cartografía de emisiones terrestres mediante desagregación espacial. El mapa de calor ilustra las zonas de mayor concentración de actividad vehicular en las comunas analizadas.

Pero el análisis no se agota en la visualización de mapas de calor. La verdadera potencia de la herramienta radica en su capacidad matemática para capturar esos polígonos geográficos y traducirlos instantáneamente a métricas absolutas de tonelaje para cualquier jurisdicción que el investigador decida delimitar. Tomando como caso de prueba la Región de Valparaíso bajo el escenario del año 2023, lo cual también fue parte de un trabajo de consultoría solicitado, se configuró el modelo para extraer el comportamiento individual de sus municipios. El resultado de esta consulta se plasma en la Figura 3.19, donde se disgrega el total de  $CO_2$  emitido por cada comuna.

Basta una lectura rápida de la gráfica para desnudar la profunda asimetría de la

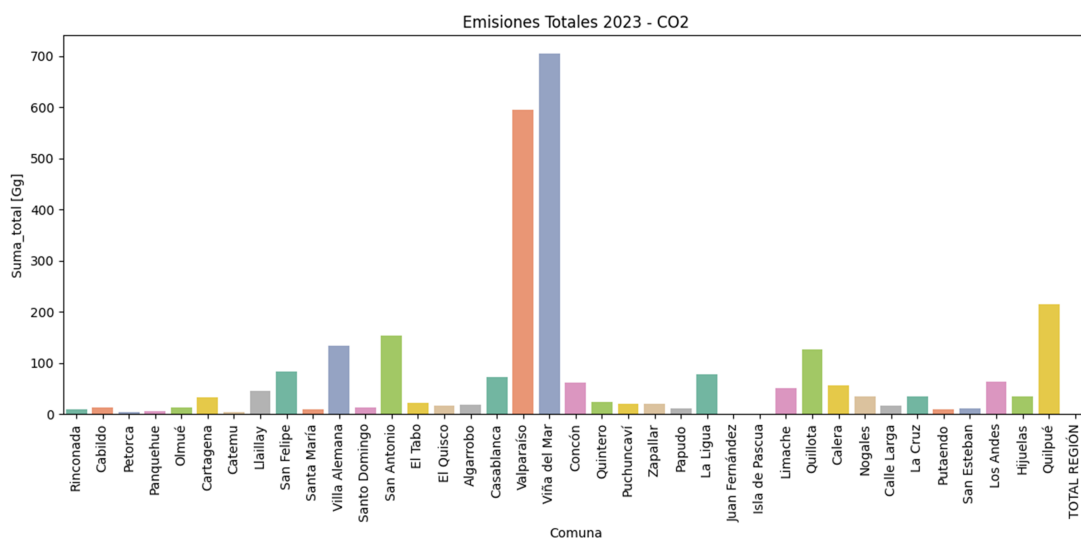


Figura 3.19: Inventario comunal de emisiones de  $CO_2$  en la Región de Valparaíso (año 2023), demostrando la asimetría en la contribución de los distintos centros urbanos.

huella de carbono regional, dado que las columnas correspondientes a Viña del Mar y Valparaíso se disparan notoriamente por sobre el resto, acaparando el grueso del volumen de gases contaminantes producto de su densa aglomeración demográfica y su intensa actividad portuaria y comercial. En la vereda opuesta, localidades con un perfil más agrícola o de menor flujo, como Rinconada, Panquehue o Juan Fernández, registran barras prácticamente marginales. Esta capacidad dual del modelo, capaz de ilustrar la dispersión del fenómeno en un mapa y, acto seguido, tabular con exactitud matemática la responsabilidad de cada territorio, lo consolida como un modelo práctico y esencial para la toma de decisiones. Demuestra que no estamos ante una herramienta rígida de proyecciones nacionales y desagregación espacial, sino que frente a un motor de cálculo adaptable, diseñado para responder a las preguntas concretas que enfrentan a diario los municipios y los planificadores urbanos.

### 3.1.2. Validación del Inventario

Por otro lado, para dotar de robustez metodológica al inventario de emisiones terrestres generado y asegurar que el cálculo de la actividad concuerda con la realidad macroeconómica del país, es necesario someter los resultados a un proceso de validación cruzada para confirmar, corroborar y validar los resultados obtenidos de los modelos generados, ya que la literatura especializada en modelación e ingeniería ambiental su-

giere contrastar las estimaciones locales de tipo *bottom-up* con repositorios globales y agencias internacionales, las cuales generalmente emplean enfoques *top-down*, basando sus métricas en los balances nacionales de importación y venta de combustible.

Con este propósito, se compararon las series de tiempo del modelo desarrollado frente a bases de datos de amplio respaldo, tales como EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research), CEDS, CAMS y los registros oficiales de la Agencia Internacional de Energía (IEA).

Al inspeccionar la gráfica superior de la figura 3.20, la trayectoria del dióxido de carbono trazada por el algoritmo generado (línea roja gruesa) exhibe una congruencia estructural notable. La curva no solo captura la tendencia secular de crecimiento impulsada por la explosión del parque automotriz, sino que se acopla casi a la perfección con el perfil dictado por la IEA. Este alineamiento es un indicador de éxito algorítmico crítico, el cual a su vez confirma que el consumo volumétrico de combustible, deducido matemáticamente a partir de la suma del VKT de millones de vehículos como se explicó anteriormente en el capítulo de metodología, coincide con el combustible físico que el país reporta haber quemado. Asimismo, la sensibilidad del modelo queda demostrada al replicar fielmente el impacto contractivo del año 2020 originado por las cuarentenas, un fenómeno que las bases de resolución más gruesa tienden a suavizar. De la misma manera, la modelación de los óxidos de nitrógeno (gráfica inferior) entraña una complejidad termodinámica superior pero entendible y lógica, ya que la liberación de este contaminante no obedece linealmente al volumen de diésel o gasolina consumida, sino a las temperaturas de cámara, la degradación de los catalizadores y los estándares de importación (Normas Euro) de la flota circulante. En este sentido, las discrepancias basales entre los propios repositorios globales (CEDS vs. EDGAR) reflejan la enorme incertidumbre que gobierna la estimación del  $NO_x$  a nivel macro. Bajo este escenario de dispersión internacional, los resultados del modelo *bottom-up* logran trazar una ruta por el centro del corredor de incertidumbre. La curva propia logra capturar el ascenso descontrolado durante la década de los noventa y el posterior quiebre y declive originado por el recambio tecnológico del transporte de carga y la inserción de nuevas normativas vehiculares mucho más estrictas en cuanto a la liberación de este contaminante. Esta fluctuación valida empíricamente que los factores de emisión dinámicos y la estratificación del parque parametrizados en el código representan con alta fidelidad la física real del sistema vial chileno, otorgando un piso de confiabilidad para las futuras proyecciones.

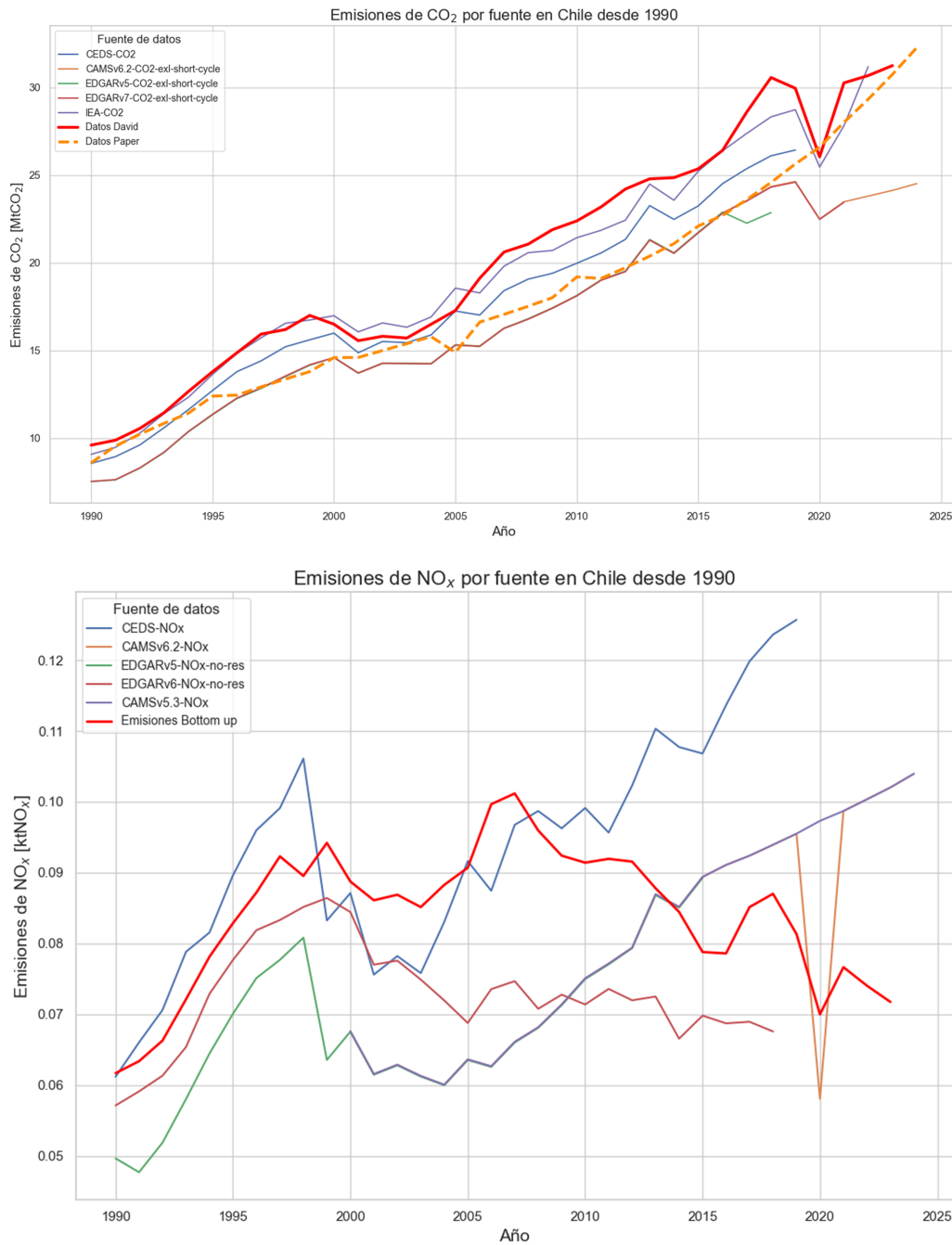


Figura 3.20: Validación histórica del modelo terrestre (1990-2023). Arriba: Contraste de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) frente a repositorios internacionales, destacando la fuerte convergencia con los datos de la IEA. Abajo: Comparativa para óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), donde la estimación *bottom-up* navega de forma coherente dentro del espectro de dispersión de los modelos globales.

## 3.2. Transporte Aéreo

Ahora, respecto a las emisiones y comportamiento del transporte aéreo, al adentrarnos en la caracterización de las fuentes móviles, el primer paso exige mapear la estructura operativa del mercado nacional. A diferencia del entramado terrestre, que goza de múltiples capilaridades y rutas alternativas, la aviación comercial en Chile opera bajo un esquema de red radial fuertemente centralizado.

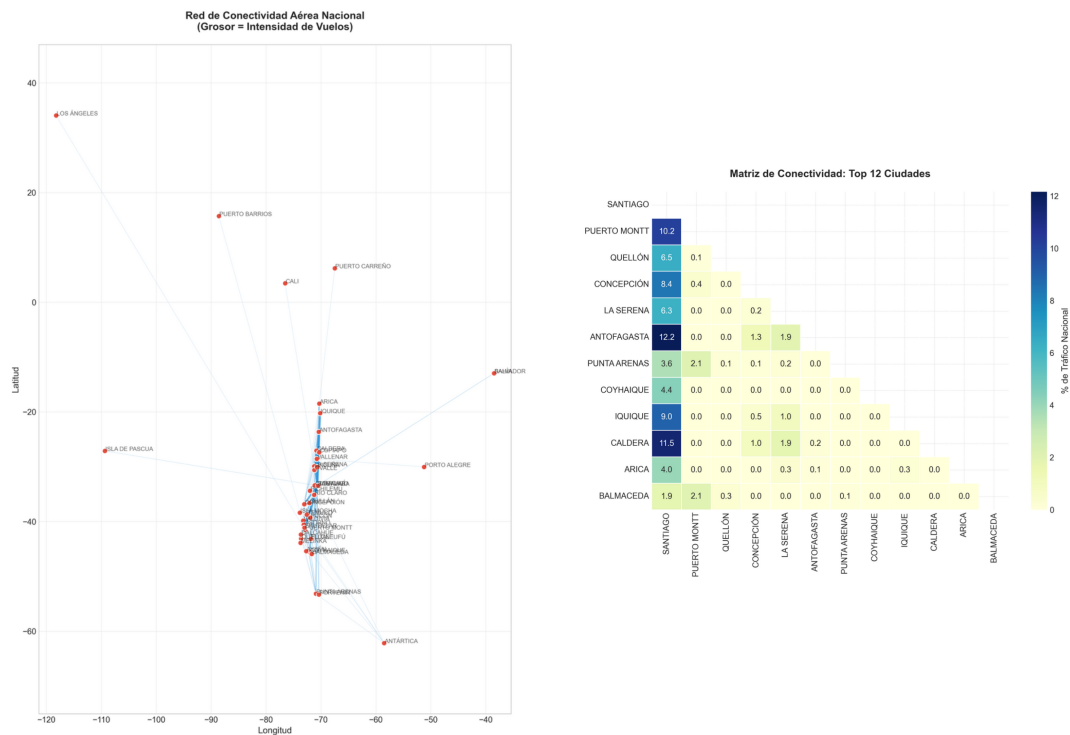


Figura 3.21: Caracterización estructural del tráfico aéreo. Izquierda: Mapeo de la conectividad nacional en donde se ilustra la intensidad de flujo. Derecha: Matriz de tráfico porcentual entre las 12 ciudades principales, confirmando la hegemonía del nodo central.

Esta logística queda en evidencia al observar la cartografía y la matriz de conectividad expuestas en la figura 3.21 anteriormente presentada, la cual corresponde al año 2023 particularmente, aunque el comportamiento el resto de los años es análogo. El mapa traza vectores que convergen casi en su totalidad hacia la latitud de la Región Metropolitana, llegando al aeropuerto de Santiago. Por su parte, la matriz de calor corrobora este comportamiento, dado que se logra observar que los cruces entre ciudades de regiones (vuelos interregionales puros, como Antofagasta-La Serena)

ostentan porcentajes de tráfico ínfimos, rara vez superando el 1 %, y en contraparte, las columnas asociadas a Santiago absorben la demanda, destacando rutas troncales como Santiago-Antofagasta (12.2 %). Esta dependencia del terminal central impone las primeras restricciones geométricas al momento de trazar las trayectorias de emisión sobre el territorio.

Por otro lado, comprender la cantidad de despegues y aterrizajes es esencial y fundamental aunque resuelve solo una fracción del problema ambiental. Para lograr una correcta desagregación espacial de los contaminantes a lo largo del espacio aéreo, resulta imperativo cuantificar el trabajo físico real que realizan las aeronaves. Aquí entra en juego un indicador fundamental para la modelación, el cual fue explicado con mayor detalle en capítulos anteriores, el Esfuerzo de Transporte, comúnmente denominado FKM (Vuelos  $\times$  Kilómetros). Este factor, calculado mediante la multiplicación de la frecuencia anual de una ruta por su distancia recorrida, es el parámetro que otorga el peso ponderado real a los proxies espaciales para la fase de vuelo en altitud.

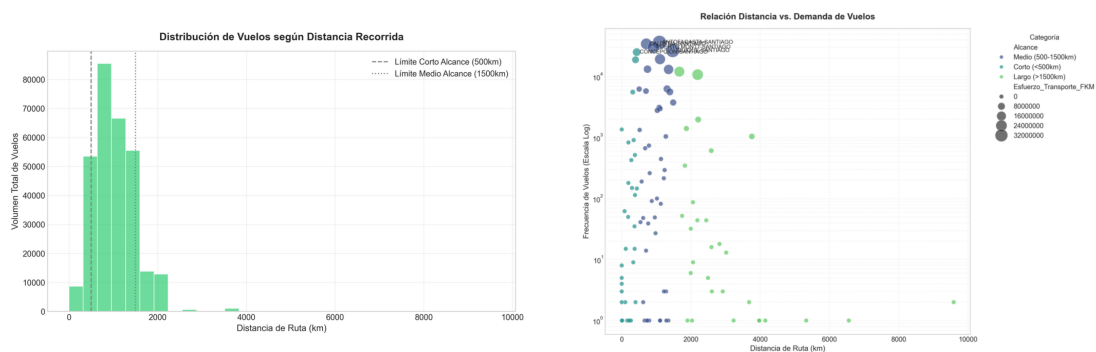


Figura 3.22: Dinámica operativa de la flota. Izquierda: Histograma que evidencia la concentración de la demanda en tramos de corto y medio alcance. Derecha: Dispersión de rutas según frecuencia y distancia; el tamaño de la burbuja parametriza el indicador FKM, revelando el verdadero peso ambiental de cada trayecto.

Si analizamos la geometría de los viajes a través del histograma de la figura 3.22, salta a la vista que el volumen operativo del país está dominado por tramos de corto y medio alcance (inferiores a los 1.500 km). Sin embargo, al cruzar esta frecuencia con la distancia en el gráfico de dispersión, la burbuja correspondiente al FKM nos revela una historia interesante, ya que rutas extremadamente largas, como las que conectan con Punta Arenas o Rapa Nui, compensan su baja cantidad de vuelos con enormes trayectos de quema continua de combustible, inflando su burbuja de esfuerzo de transporte a niveles comparables con los puentes aéreos del norte minero.

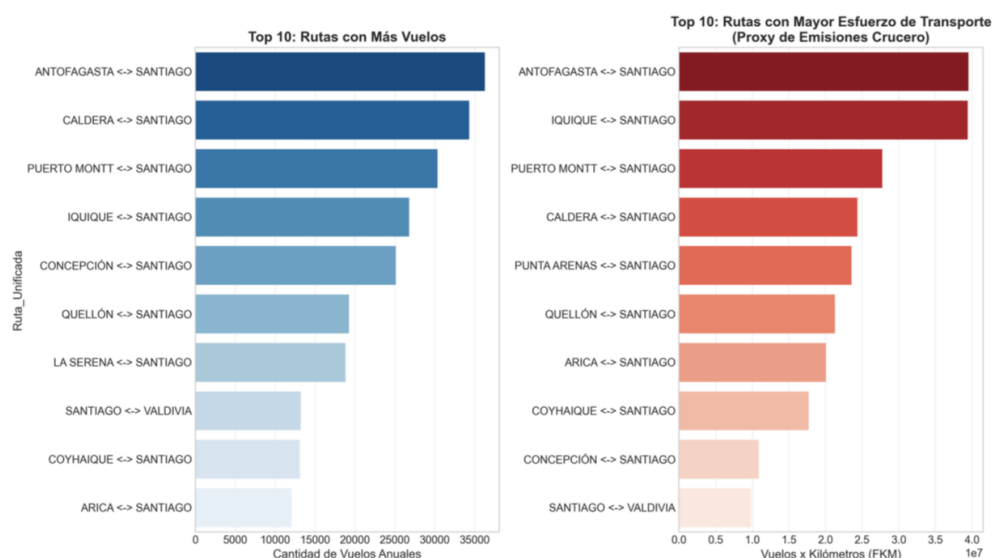


Figura 3.23: Contraste metodológico: Top 10 rutas ordenadas por cantidad bruta de vuelos (izquierda) frente al ordenamiento por Esfuerzo de Transporte o FKM (derecha). El FKM reescribe la jerarquía de emisiones, elevando el impacto de conexiones australes y largas distancias.

La utilidad práctica de adoptar el FKM para calibrar los proxies espaciales se materializa en la figura 3.23. Mientras que el ranking tradicional por número de vuelos sitúa a trayectos cortos como Concepción-Santiago muy arriba en la tabla, el ordenamiento por FKM reordena esta situación y cambia la jerarquización, desplazándola hacia el fondo. En su lugar, rutas de alta exigencia kilométrica como Punta Arenas o Iquique escalan posiciones vertiginosamente. Integrar el FKM asegura que las celdas del mapa de emisiones en zonas remotas no queden subrepresentadas, distribuyendo la huella del queroseno de aviación con fidelidad termodinámica a lo largo de todo el corredor de vuelo.

Ahora bien, se tiene que la integración del FKM y las frecuencias de operación cristalizan en el inventario de emisiones de la aviación comercial. En este punto, la metodología exige separar estas emisiones en dos regímenes físicos según lo mencionado con anterioridad, por una lado la fase de Crucero o CCD (*Climb-Cruise-Descent*), responsable del grueso de los gases de efecto invernadero a gran altitud, y por otro lado el ciclo LTO (*Landing and Take-Off*), que inyecta contaminantes directamente sobre el radio urbano de las terminales aéreas.

El gráfico de barras apiladas (figura 3.24) cuantifica esta partición para el dióxido de carbono. Como dictan las leyes de la aerodinámica, la fase de crucero domina

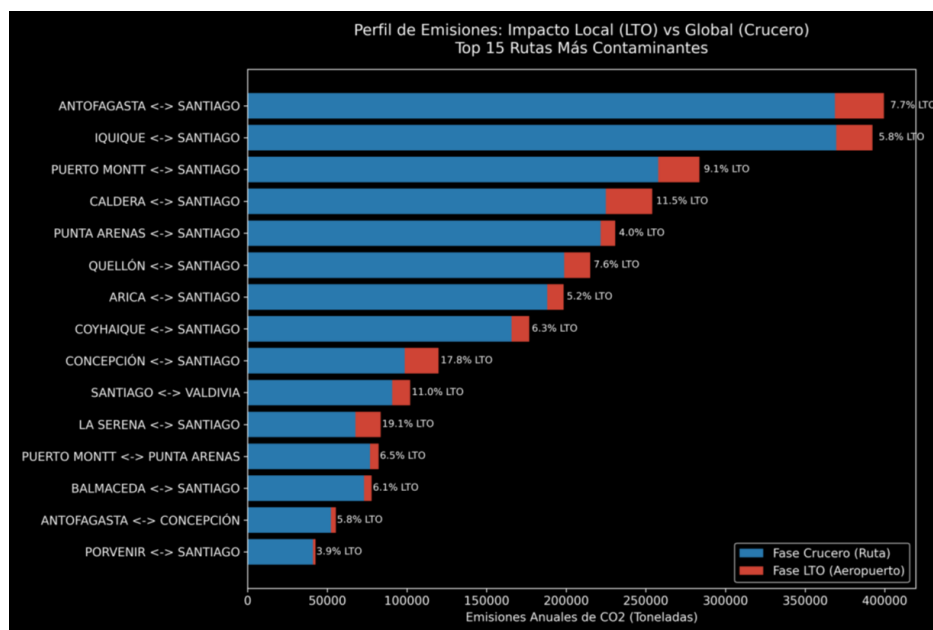


Figura 3.24: Desglose de la huella de carbono ( $CO_2$ ) para las 15 rutas más contaminantes del país. La barra distingue la contribución volumétrica de la fase de crucero (CCD) y la carga ambiental depositada a nivel de suelo durante los ciclos LTO.

abrumadoramente el balance másico total, acaparando en promedio más del 90 % de lo emitido en las grandes conexiones interregionales. En rutas como La Serena-Santiago o Concepción-Santiago, la fracción LTO aumenta, rozando el 19 %. Al disponer de menos kilómetros para diluir el enorme costo energético y contaminación que significa elevar la aeronave, estos puentes aéreos cortos terminan siendo proporcionalmente mucho más agresivos para la calidad del aire local de las comunas aledañas a los aeropuertos, un factor crítico que este modelo logra capturar y georreferenciar de manera certera.

### 3.2.1. Desagregación Espacial de Emisiones Aéreas

El escalamiento territorial de las emisiones provenientes de la aviación comercial y civil impone un desafío cartográfico sustancialmente distinto al del parque automotriz, dado que a diferencia del transporte terrestre, cuyo flujo se encuentra confinado a la infraestructura vial estática, las aeronaves se desplazan a través de corredores tridimensionales dinámicos. Para asignar espacialmente la quema de combustible de turbina (Jet A-1) y la consecuente liberación de contaminantes, resulta imperativa la correcta formulación de las rutas virtuales que representen estadísticamente los patrones de vuelo a lo largo del espacio aéreo nacional. Es con este fin en mente, que se ejecutó un



proceso intensivo de levantamiento y fusión de datos. La construcción de las trayectorias base se nutrió de la superposición de múltiples fuentes, en donde se incluyeron y analizaron bases de datos aeronáuticas proveídas por entidades gubernamentales oficiales, bitácoras operacionales y frecuencias de vuelo obtenidas mediante solicitudes por Ley de Transparencia, y también el procesamiento de registros telemáticos extraídos de plataformas de monitoreo satelital de tráfico (tales como las interfaces de seguimiento posicional incluyendo a MarineTraffic). Esta triangulación de información permitió trazar los primeros vectores direccionales que conectan los terminales aeroportuarios del país.



Figura 3.25: Trazado preliminar de corredores aéreos a escala macrozonal (Norte, Centro y Sur). Estas líneas actúan como vectores de distribución espacial para asignar el consumo de combustible en la fase de crucero.

La figura 3.25 exhibe los resultados de esta primera etapa de modelación a nivel nacional. Las líneas visualizadas operan como *proxies* geométricos, dotados de un peso ponderado inicial basado en la densidad de tráfico estimada. Esta representación captura las principales aerovías longitudinales que atraviesan las regiones, fundamentales para distribuir las emisiones correspondientes a la fase de crucero, donde las aeronaves alcanzan su máxima altitud y eficiencia termodinámica.

Sin embargo, la aproximación a los polos urbanos y aeropuertos exige una mayor resolución. Las operaciones de despegue y aterrizaje, conocidas en la literatura como ciclos LTO (*Landing and Take-Off*), concentran una alta liberación de contaminantes locales a baja altura, impactando directamente en la calidad del aire de las comunas aledañas a las pistas.

Al enfocar el análisis y esta primera iteración y cálculo de los pesos ponderados

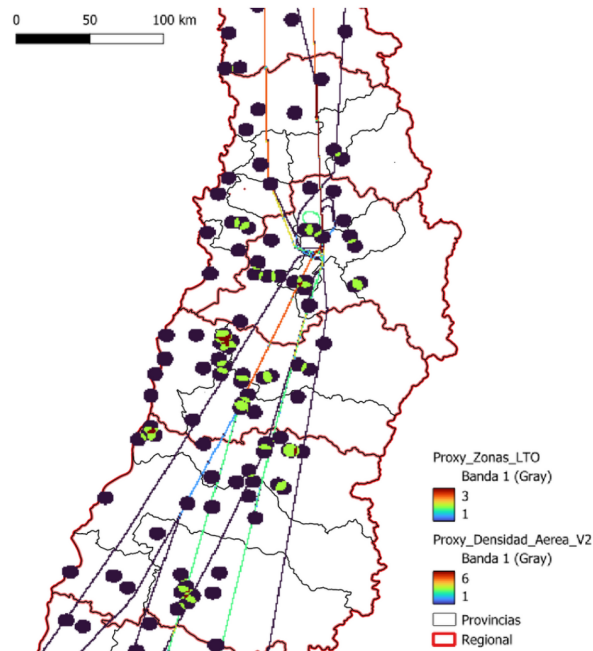


Figura 3.26: Detalle cartográfico de los ponderadores espaciales en la zona central. Se distinguen las áreas de influencia directa de los aeropuertos y la convergencia de las rutas aéreas hacia el terminal principal.

en la zona central del país, como se ilustra en la figura 3.26, la complejidad de la red se hace evidente. El modelo diferencia geográficamente las celdas asociadas a la fase de vuelo de aquellas sujetas a los ciclos LTO en las inmediaciones de los aeropuertos. Los nodos y gradientes de color identifican preliminarmente las zonas de mayor carga operativa. Cabe destacar que los mapas presentados en esta sección constituyen la arquitectura cartográfica fundamental y la base preliminar de la consecuente desagregación espacial del modelo aéreo. Estos pesos ponderados iniciales representan una versión en desarrollo que, en las siguientes iteraciones del estudio y del presente escrito, será sometida a rutinas de suavizado y calibración topológica. Este refinamiento metodológico asegurará que la desagregación final de las emisiones aéreas refleje con exactitud la huella ambiental de la aviación sobre el territorio chileno.

Ahora bien, para lograr esta correcta desagregación espacial de las emisiones aéreas, lo primero que se ha realizado es la creación de modelos computacionales capaces de procesar un volumen enorme de información, superando el millón de datos en algunos casos, y poder calcular con precisión quirúrgica las emisiones asociadas a cada aeronave cruzando toda la información necesaria para este cálculo preciso de emisiones de cada contaminante, para luego agrupar y unificar estas rutas y generar archivos excel que

tengan toda la información necesaria de las rutas de los corredores aéreos principales, como las distancias de estas, la frecuencia, los aeropuertos de origen y destino con sus respectivas latitudes y longitudes, el factor esfuerzo transporte asociada a cada ruta, etc.

| Ruta_Unificada                | Suma de Contador | Porcentaje  | Porcentaje_Acumulado | Categoría       | Origen         | Destino      | Lat_Orig | Lon_Orig  | Lat_Dest | Lon_Dest | Distancia_KM | Esfuerzo_Transporte_FKM | Alcance            |
|-------------------------------|------------------|-------------|----------------------|-----------------|----------------|--------------|----------|-----------|----------|----------|--------------|-------------------------|--------------------|
| ANTOFAGASTA <-> SANTIAGO      | 36269            | 12.15832065 | 12.15832065          | Principal (80%) | ANTOFAGASTA    | SANTIAGO     | -23.65   | -70.4     | -33.4489 | -70.6693 | 1089.903955  | 39529726.54             | Medio (500-1500km) |
| CALDERA <-> SANTIAGO          | 34307            | 11.50060676 | 23.65892741          | Principal (80%) | CALDERA        | SANTIAGO     | -27.0669 | -70.8167  | -33.4489 | -70.6693 | 709.7869291  | 24350660.18             | Medio (500-1500km) |
| PUERTO MONTT <-> SANTIAGO     | 30347            | 10.17311083 | 33.83203824          | Principal (80%) | PUERTO MONTT   | SANTIAGO     | -41.4717 | -72.9369  | -33.4489 | -70.6693 | 914.1710836  | 27742349.87             | Medio (500-1500km) |
| IQUIQUE <-> SANTIAGO          | 26778            | 8.976688367 | 42.80872661          | Principal (80%) | IQUIQUE        | SANTIAGO     | -20.2141 | -70.1529  | -33.4489 | -70.6693 | 1472.527328  | 39431336.79             | Medio (500-1500km) |
| CONCEPCIÓN <-> SANTIAGO       | 25139            | 8.427252553 | 51.23597916          | Principal (80%) | CONCEPCIÓN     | SANTIAGO     | -36.8201 | -73.0444  | -33.4489 | -70.6693 | 432.5880686  | 10874831.46             | Corto (<500km)     |
| QUELLÓN <-> SANTIAGO          | 19263            | 6.457463142 | 57.6934423           | Principal (80%) | QUELLÓN        | SANTIAGO     | -43.1207 | -73.6163  | -33.4489 | -70.6693 | 1105.580308  | 21296793.47             | Medio (500-1500km) |
| LA SERENA <-> SANTIAGO        | 18813            | 6.306611332 | 64.0005364           | Principal (80%) | LA SERENA      | SANTIAGO     | -29.9027 | -71.2519  | -33.4489 | -70.6693 | 396.1522979  | 7490438.18              | Corto (<500km)     |
| SANTIAGO <-> VALDIVIA         | 13197            | 4.423980745 | 68.42403438          | Principal (80%) | SANTIAGO       | VALDIVIA     | -33.4489 | -70.6693  | -39.8174 | -73.2425 | 744.3398668  | 9823053.223             | Medio (500-1500km) |
| COYHAIQUE <-> SANTIAGO        | 13076            | 4.383418369 | 72.80745275          | Principal (80%) | COYHAIQUE      | SANTIAGO     | -45.5711 | -72.0683  | -33.4489 | -70.6693 | 1353.199098  | 17694431.4              | Medio (500-1500km) |
| ARICA <-> SANTIAGO            | 12040            | 4.03612398  | 76.84357673          | Principal (80%) | ARICA          | SANTIAGO     | -18.4783 | -70.3126  | -33.4489 | -70.6693 | 1665.03295   | 20040996.71             | Largo (>1500km)    |
| PUNTA ARENAS <-> SANTIAGO     | 10739            | 3.599994636 | 80.44357137          | Secundaria      | PUNTA ARENAS   | SANTIAGO     | -53.1638 | -70.9171  | -33.4489 | -70.6693 | 2192.285214  | 23542950.92             | Largo (>1500km)    |
| PUERTO MONTT <-> PUNTA ARENAS | 6276             | 2.103879989 | 82.54745127          | Secundaria      | PUERTO MONTT   | PUNTA ARENAS | -41.4717 | -72.9369  | -53.1638 | -70.9171 | 1308.847429  | 8214326.467             | Medio (500-1500km) |
| BALMACEDA <-> PUERTO MONTT    | 6229             | 2.088124275 | 84.63557555          | Secundaria      | BALMACEDA      | PUERTO MONTT | -45.9167 | -71.7     | -41.4717 | -72.9369 | 504.1476233  | 3140335.545             | Medio (500-1500km) |
| ANTOFAGASTA <-> LA SERENA     | 5777             | 1.936602013 | 86.57217756          | Secundaria      | ANTOFAGASTA    | LA SERENA    | -23.65   | -70.4     | -29.9027 | -71.2519 | 700.3840152  | 4046118.456             | Medio (500-1500km) |
| BALMACEDA <-> SANTIAGO        | 5614             | 1.881960135 | 88.45413777          | Secundaria      | BALMACEDA      | SANTIAGO     | -45.9167 | -71.7     | -33.4489 | -70.6693 | 1389.125031  | 7798547.923             | Medio (500-1500km) |
| CALDERA <-> LA SERENA         | 5559             | 1.863522691 | 90.31766039          | Secundaria      | CALDERA        | LA SERENA    | -27.0669 | -70.8167  | -29.9027 | -71.2519 | 318.1812065  | 1768769.327             | Corto (<500km)     |
| ANTOFAGASTA <-> CONCEPCIÓN    | 3750             | 1.257098416 | 91.5747588           | Secundaria      | ANTOFAGASTA    | CONCEPCIÓN   | -23.65   | -70.4     | -36.8201 | -73.0444 | 1486.125521  | 5572970.705             | Medio (500-1500km) |
| IQUIQUE <-> LA SERENA         | 3116             | 1.044564977 | 92.61932378          | Secundaria      | IQUIQUE        | LA SERENA    | -20.2141 | -70.1529  | -29.9027 | -71.2519 | 1082.973428  | 3374545.201             | Medio (500-1500km) |
| CALDERA <-> CONCEPCIÓN        | 2970             | 0.995621945 | 93.61494573          | Secundaria      | CALDERA        | CONCEPCIÓN   | -27.0669 | -70.8167  | -36.8201 | -73.0444 | 1104.583355  | 3280612.564             | Medio (500-1500km) |
| DALCAHUE <-> SANTIAGO         | 2786             | 0.933940316 | 94.54888604          | Secundaria      | DALCAHUE       | SANTIAGO     | -42.3803 | -73.6519  | -33.4489 | -70.6693 | 1026.821414  | 2860724.46              | Medio (500-1500km) |
| PORVENIR <-> SANTIAGO         | 1970             | 0.660395701 | 95.20928174          | Secundaria      | PORVENIR       | SANTIAGO     | -53.3023 | -70.3666  | -33.4489 | -70.6693 | 2207.727891  | 4349223.346             | Largo (>1500km)    |
| CONCEPCIÓN <-> IQUIQUE        | 1405             | 0.470992873 | 95.68027462          | Secundaria      | CONCEPCIÓN     | IQUIQUE      | -36.8201 | -73.0444  | -20.2141 | -70.1529 | 1867.705612  | 2624126.384             | Largo (>1500km)    |
| SANTIAGO <-> SANTIAGO         | 1357             | 0.454902013 | 96.13517663          | Secundaria      | SANTIAGO       | SANTIAGO     | -33.4489 | -70.6693  | -33.4489 | -70.6693 | 0            | 0                       | Corto (<500km)     |
| CONCEPCIÓN <-> PUERTO MONTT   | 1331             | 0.446186131 | 96.58136276          | Secundaria      | CONCEPCIÓN     | PUERTO MONTT | -36.8201 | -73.0444  | -41.4717 | -72.9369 | 517.3172544  | 688549.2656             | Medio (500-1500km) |
| ISLA DE PASCUA <-> SANTIAGO   | 1043             | 0.349640973 | 96.93100373          | Secundaria      | ISLA DE PASCUA | SANTIAGO     | -27.1127 | -109.3497 | -33.4489 | -70.6693 | 3758.460137  | 3920073.923             | Largo (>1500km)    |
| ARICA <-> LA SERENA           | 1042             | 0.349305746 | 97.28030948          | Secundaria      | ARICA          | LA SERENA    | -18.4783 | -70.3126  | -29.9027 | -71.2519 | 1273.884035  | 1327387.165             | Medio (500-1500km) |
| BALMACEDA <-> QUELLÓN         | 908              | 0.30438543  | 97.58460491          | Secundaria      | BALMACEDA      | QUELLÓN      | -45.9167 | -71.7     | -43.1207 | -73.6163 | 346.0116318  | 314178.5617             | Corto (<500km)     |
| ARICA <-> IQUIQUE             | 830              | 0.278237783 | 97.86293269          | Secundaria      | ARICA          | IQUIQUE      | -18.4783 | -70.3126  | -20.2141 | -70.1529 | 193.7379571  | 160802.5044             | Corto (<500km)     |
| CONCEPCIÓN <-> LA SERENA      | 738              | 0.247396968 | 98.11032966          | Secundaria      | CONCEPCIÓN     | LA SERENA    | -36.8201 | -73.0444  | -29.9027 | -71.2519 | 786.9387984  | 580760.8333             | Medio (500-1500km) |
| COPÍAPO <-> SANTIAGO          | 667              | 0.223595905 | 98.33392557          | Secundaria      | COPÍAPO        | SANTIAGO     | -27.3668 | -70.3322  | -33.4489 | -70.6693 | 677.0693944  | 451605.2861             | Medio (500-1500km) |
| LA SERENA <-> PUNTA ARENAS    | 609              | 0.204152783 | 98.53807835          | Secundaria      | LA SERENA      | PUNTA ARENAS | -29.9027 | -71.2519  | -53.1638 | -70.9171 | 2586.659443  | 1575275.601             | Largo (>1500km)    |
| ANTOFAGASTA <-> CALDERA       | 517              | 0.173311968 | 98.71139032          | Secundaria      | ANTOFAGASTA    | CALDERA      | -23.65   | -70.4     | -27.0669 | -70.8167 | 382.2409431  | 197618.5676             | Corto (<500km)     |
| PUNTA ARENAS <-> QUELLÓN      | 445              | 0.149175679 | 98.860566            | Secundaria      | PUNTA ARENAS   | QUELLÓN      | -53.1638 | -70.9171  | -43.1207 | -73.6163 | 1134.341771  | 504782.0882             | Medio (500-1500km) |
| MELINKA <-> PUERTO MONTT      | 426              | 0.14280638  | 99.00337238          | Secundaria      | MELINKA        | PUERTO MONTT | -43.8972 | -73.7428  | -41.4717 | -72.9369 | 277.6272145  | 118269.1934             | Corto (<500km)     |
| CONCEPCIÓN <-> PUNTA ARENAS   | 346              | 0.11598828  | 99.11396066          | Secundaria      | CONCEPCIÓN     | PUNTA ARENAS | -36.8201 | -73.0444  | -53.1638 | -70.9171 | 1824.810185  | 631384.3242             | Largo (>1500km)    |
| ANTÁRTICA <-> PUNTA ARENAS    | 293              | 0.09822129  | 99.21758195          | Secundaria      | ANTÁRTICA      | PUNTA ARENAS | -62.1598 | -58.4926  | -53.1638 | -70.9171 | 1239.235496  | 363096.0003             | Medio (500-1500km) |

Figura 3.27: Ejemplo del archivo excel generado con las rutas aéreas unificadas y toda su información respectiva.

En la Figura 3.27 se presenta un ejemplo de este archivo excel generado mediante los modelos computacionales implementados. Luego este archivo excel se ha usado como input para alimentar otros modelos computacionales que logren leer y procesar esta información, y cruzarla con las rutas aéreas para generar un archivo geopackage con toda esta información incluida en su tabla de atributos y también generar archivos excel con toda la información de emisiones separadas en sus fases CCD y LTO, los cuales se presentan en las figuras 3.28 y 3.29. Estos archivos son fundamentales ya que luego serán los insumos para los modelos finales de desagregación espacial de emisiones con una alta resolución espacial.

En la Figura 3.30 se presenta el resultados del archivo geopackage generado por los modelos mencionados. Este archivo geopackage se puede leer en los sistemas de información geográfica como QGIS y se pueden visualizar las rutas aéreas, aunque lo más importante es que en su tabla de atributos contiene toda la información de emisiones asociadas a cada ruta y aeropuerto. Esto es crucial ya que los siguientes scripts realizados pueden alimentarse de este archivo, entre otros, para generar la desagregación espacial.

Algo importante a destacar y recordar es que en todo momento se han realizado e implementado en los programas ejecutados balances de masas respectivos para asegurar que no se esté perdiendo información de emisiones, estos balances de masa cuentan con

| ROUTE_KEY        | Ruta_Unificada                | Distancia_KM | Esfuerzo_Transporte_FKM | Suma de Contador | Gg_PM TOTAL_CCD | Gg_PM NON VOLATILE_CCD | Gg_HC_CCD   | Gg_CO_CCD   | Gg_NOX_CCD  | Gg_SOX_CCD  | Gg_CO2_CCD  |
|------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------|------------------|-----------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SCFL-SCFA        | ANTOFAGASTA <-> SANTIAGO      | 1089.903955  | 39529726.54             | 36269            | 0.021657985     | 0.004950131            | 0.019892506 | 0.196197412 | 2.050454213 | 0.131964769 | 494.8677371 |
| SCAT-SCFL        | CALDERA <-> SANTIAGO          | 709.7869291  | 24350660.18             | 34307            | 0.01334151      | 0.003049324            | 0.012253959 | 0.120859336 | 1.263097879 | 0.081291461 | 304.8428905 |
| SCFL-SCPM        | PUERTO MONTT <-> SANTIAGO     | 914.1710836  | 27742348.87             | 30347            | 0.015199786     | 0.003474051            | 0.013960756 | 0.137693269 | 1.439028882 | 0.092614169 | 347.3030326 |
| SCDA-SCFL        | IQUIQUE <-> SANTIAGO          | 1472.527328  | 39431336.79             | 26778            | 0.021604078     | 0.00493781             | 0.019842994 | 0.195709076 | 2.045350519 | 0.131363308 | 493.6360081 |
| CONCEPCIN-SCFL   | CONCEPCIÓN <-> SANTIAGO       | 432.5880686  | 10874831.46             | 25139            | 0.005958223     | 0.001361807            | 0.005472531 | 0.053974919 | 0.56409052  | 0.036304188 | 136.1406644 |
| QUELLN-SCFL      | QUELLÓN <-> SANTIAGO          | 1105.580308  | 21296793.47             | 19263            | 0.011668323     | 0.002666902            | 0.010717165 | 0.105702117 | 1.104690159 | 0.071096531 | 266.6119125 |
| SCFL-SCSE        | LA SERENA <-> SANTIAGO        | 398.1522979  | 7490439.18              | 18813            | 0.004103945     | 0.000937994            | 0.003769407 | 0.037177206 | 0.388538043 | 0.032790581 | 93.77187782 |
| SCFL-SCVD        | SANTIAGO <-> VALDIVIA         | 744.3398668  | 9823053.223             | 13197            | 0.005381963     | 0.001230097            | 0.004943246 | 0.048754641 | 0.509533524 | 0.023792965 | 122.9735833 |
| SCAT-SCFL        | COYHAIQUE <-> SANTIAGO        | 1353.190908  | 17694431.4              | 13076            | 0.009694621     | 0.002215795            | 0.008904352 | 0.087822557 | 0.917831329 | 0.059070521 | 221.5143892 |
| SCAR-SCFL        | ARICA <-> SANTIAGO            | 1665.03295   | 20046996.71             | 12040            | 0.010983571     | 0.002510396            | 0.010088231 | 0.099499016 | 1.039861706 | 0.06692425  | 250.9658621 |
| SCCI-SCFL        | PUNTA ARENAS <-> SANTIAGO     | 2192.285214  | 23542950.92             | 10739            | 0.012898973     | 0.002948179            | 0.011847497 | 0.118650443 | 1.221201033 | 0.078599501 | 294.7312786 |
| SCCI-SCPM        | PUERTO MONTT <-> PUNTA ARENAS | 1308.847429  | 8214326.467             | 6276             | 0.004500556     | 0.001028643            | 0.004133688 | 0.040770067 | 0.426086942 | 0.027422443 | 102.8341229 |
| SCBA-SCPM        | BALMACEDA <-> PUERTO MONTT    | 504.1476233  | 3140335.545             | 6229             | 0.001720562     | 0.00039325             | 0.001580308 | 0.015586389 | 0.162892962 | 0.010483505 | 39.31347068 |
| SCFA-SCSE        | ANTOFAGASTA <-> LA SERENA     | 700.3840152  | 4046118.456             | 5777             | 0.002216832     | 0.000506677            | 0.002036124 | 0.020082051 | 0.209877006 | 0.013507432 | 50.65285444 |
| SCBA-SCFL        | BALMACEDA <-> SANTIAGO        | 1389.125031  | 7798547.923             | 5614             | 0.004272755     | 0.000976577            | 0.003924456 | 0.038706438 | 0.404520012 | 0.026034422 | 97.62905291 |
| SCAT-SCSE        | CALDERA <-> LA SERENA         | 318.1812065  | 1768769.327             | 5559             | 0.000969093     | 0.000221495            | 0.000890096 | 0.008778911 | 0.091748181 | 0.005904803 | 22.14300353 |
| CONCEPCIN-SCFA   | ANTOFAGASTA <-> CONCEPCIÓN    | 1486.125521  | 5572970.705             | 3750             | 0.003053381     | 0.000697878            | 0.002804481 | 0.027660258 | 0.289076659 | 0.018604626 | 69.76732812 |
| SCDA-SCSE        | IQUIQUE <-> LA SERENA         | 1082.973428  | 3374545.201             | 3116             | 0.001848883     | 0.000442579            | 0.001698169 | 0.016748839 | 0.175041697 | 0.011205473 | 42.24551227 |
| CONCEPCIN-SCAT   | CALDERA <-> CONCEPCIÓN        | 1104.583355  | 3290612.564             | 2970             | 0.001797418     | 0.000410816            | 0.001616509 | 0.016286325 | 0.170169299 | 0.010951892 | 41.06958125 |
| DALCAHUE-SCFL    | DALCAHUE <-> SANTIAGO         | 1026.821414  | 2860724.46              | 2786             | 0.001567365     | 0.000358236            | 0.0014396   | 0.014198599 | 0.148389201 | 0.009550151 | 35.81305423 |
| PORVENIR-SCFL    | PORVENIR <-> SANTIAGO         | 2207.727891  | 4349023.946             | 1470             | 0.002382901     | 0.000544634            | 0.002188656 | 0.02158645  | 0.22559945  | 0.014519309 | 54.44739442 |
| CONCEPCIN-SCDA   | CONCEPCIÓN <-> IQUIQUE        | 1867.705612  | 2624126.384             | 1905             | 0.001437735     | 0.000328608            | 0.001320537 | 0.013024295 | 0.136116575 | 0.008760299 | 32.8511123  |
| SCFL-SCFL        | SANTIAGO <-> SANTIAGO         | 0            | 0                       | 1357             | 0               | 0                      | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| CONCEPCIN-SCPM   | CONCEPCIÓN <-> PUERTO MONTT   | 517.3172544  | 688549.2656             | 1331             | 0.00037725      | 8.62239E-05            | 0.000346498 | 0.003417468 | 0.035715874 | 0.002298631 | 6.819862741 |
| SCFL-SCIP        | ISLA DE PASCUA <-> SANTIAGO   | 3758.460137  | 3920073.923             | 1043             | 0.002147774     | 0.000490893            | 0.001972695 | 0.019456455 | 0.203338925 | 0.013086649 | 49.07491858 |
| SCAR-SCSE        | ARICA <-> LA SERENA           | 1273.884035  | 1327387.165             | 1042             | 0.000727264     | 0.000166223            | 0.000667798 | 0.006588205 | 0.06885316  | 0.004431307 | 16.61739506 |
| QUELLN-SCBA      | BALMACEDA <-> QUELLÓN         | 346.0116318  | 314178.5617             | 908              | 0.000172136     | 3.94432E-05            | 0.000158014 | 0.001559359 | 0.016296818 | 0.001048844 | 3.933162395 |
| SCAR-SCDA        | ARICA <-> IQUIQUE             | 193.7379571  | 160802.5044             | 830              | 8.81023E-05     | 2.01366E-05            | 8.09205E-05 | 0.000798109 | 0.008341018 | 0.000536818 | 2.013066582 |
| CONCEPCIN-SCSE   | CONCEPCIÓN <-> LA SERENA      | 786.9387984  | 580760.8333             | 738              | 0.000318194     | 7.27261E-05            | 0.000292256 | 0.002882483 | 0.032014759 | 0.001938793 | 7.270472744 |
| CORAP-SCFL       | CORIPAO <-> SANTIAGO          | 677.0693944  | 451605.2861             | 667              | 0.000247431     | 5.65525E-05            | 0.000227261 | 0.002241447 | 0.023425307 | 0.001507625 | 5.63590489  |
| SCCI-SCSE        | LA SERENA <-> PUNTA ARENAS    | 2586.659443  | 1575275.601             | 609              | 0.0006363079    | 0.000197265            | 0.000797274 | 0.007618546 | 0.08171143  | 0.005258849 | 19.72067961 |
| SCAT-SCFA        | ANTOFAGASTA <-> CALDERA       | 382.2409431  | 197618.5676             | 517              | 0.000108273     | 2.47469E-05            | 9.94474E-05 | 0.000080838 | 0.010250712 | 0.000659723 | 2.473962304 |
| QUELLN-SCCI      | PUNTA ARENAS <-> QUELLÓN      | 1134.341771  | 504782.0882             | 445              | 0.000276566     | 6.32116E-05            | 0.000254021 | 0.002505379 | 0.026183651 | 0.001685148 | 6.31930427  |
| MELINKA-SCPM     | MELINKA <-> PUERTO MONTT      | 277.6272145  | 118269.1934             | 426              | 6.47986E-05     | 1.48103E-05            | 5.95165E-05 | 0.000587004 | 0.006134765 | 0.000394826 | 1.480597343 |
| CONCEPCIN-SCCI   | CONCEPCIÓN <-> PUNTA ARENAS   | 1824.810185  | 631384.3242             | 346              | 0.00034593      | 7.90854E-05            | 0.000317731 | 0.003133742 | 0.031275066 | 0.002107793 | 7.904215939 |
| ANTOFAGASTA-SCFL | ANTOFAGASTA <-> SANTIAGO      | 1089.903955  | 39529726.54             | 36269            | 0.021657985     | 0.004950131            | 0.019892506 | 0.196197412 | 2.050454213 | 0.131964769 | 494.8677371 |

Figura 3.28: Ejemplo del archivo excel generado con las rutas aéreas unificadas y toda su información respectiva a la fase CCD

| Ciudad_Aeropuerto | Latitud   | Longitud   | Frecuencia_Vuelos | Gg_PM TOTAL_LTO | Gg_PM NON VOLATILE_LTO | Gg_HC_LTO   | Gg_CO_LTO   | Gg_NOX_LTO  | Gg_SOX_LTO  | Gg_CO2_LTO  | Gg_PM VOLATILE (ORGANIC+SULPHUROS)_LTO |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|-----------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------------|
| ANTOFAGASTA       | -260.15   | -77.4      | 46743             | 0.001135981     | 0.000589498            | 0.00924423  | 0.07716334  | 0.124395963 | 0.007528694 | 28.23258458 | 0.000546483                            |
| ANTARTICA         | -130.799  | -292.463   | 321               | 7.80117E-06     | 4.04828E-06            | 6.34832E-05 | 0.000529907 | 0.000854269 | 5.17021E-05 | 0.193882713 | 3.75288E-06                            |
| ARICA             | -129.3481 | -492.1882  | 14251             | 0.000346338     | 0.000179726            | 0.002818378 | 0.023525551 | 0.037925826 | 0.002295347 | 8.60754686  | 0.000166612                            |
| AYSEN             | -90.8072  | -145.3824  | 147               | 3.5725E-06      | 1.85389E-06            | 2.90718E-05 | 0.000242668 | 0.000391207 | 2.36767E-05 | 0.088787411 | 1.17861E-06                            |
| BAHIA             | -12.9714  | -38.5014   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| BALMACEDA         | -321.4169 | -501.9     | 13121             | 0.000318876     | 0.000165475            | 0.002594901 | 0.021660147 | 0.034918585 | 0.002113343 | 7.925031391 | 0.000153401                            |
| CALDERA           | -216.5352 | -566.5336  | 43453             | 0.001056025     | 0.000548006            | 0.00859357  | 0.071732212 | 0.115640369 | 0.006989788 | 26.24543777 | 0.000508019                            |
| CAU               | 3.4516    | -76.532    | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| CHILLAN           | -73.2132  | -144.2046  | 2                 | 4.86054E-08     | 2.5223E-08             | 3.95534E-07 | 3.3016E-06  | 5.32255E-06 | 3.22131E-07 | 0.001207992 | 2.33824E-08                            |
| CONCEPCIÓN        | -552.3015 | -1095.666  | 35972             | 0.000874217     | 0.00045366             | 0.007114075 | 0.059382577 | 0.095731373 | 0.005793855 | 21.7269437  | 0.000420557                            |
| COPILAPU          | -109.4672 | -281.3288  | 818               | 1.98796E-05     | 1.03162E-05            | 0.000161773 | 0.001350354 | 0.002176923 | 0.000131752 | 0.49406872  | 9.56342E-06                            |
| COYHAIQUE         | -410.1399 | -648.6147  | 13331             | 0.000323979     | 0.000168124            | 0.002636432 | 0.022006815 | 0.035477453 | 0.002147167 | 8.051870549 | 0.000155856                            |
| CURACAVI          | -33.3989  | -71.1399   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| DALCAHUE          | -211.9015 | -368.2595  | 3126              | 7.59702E-05     | 3.94235E-05            | 0.00061822  | 0.005160401 | 0.008319145 | 0.000503491 | 1.888091466 | 3.65468E-05                            |
| FRUTILLAR         | -41.1264  | -73.03     | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| FUTALEUFU         | -43.182   | -71.8675   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| IQUIQUE           | -181.9269 | -631.3761  | 32303             | 0.00078505      | 0.000407389            | 0.006388468 | 0.053325792 | 0.085967156 | 0.005202905 | 19.51088248 | 0.000377662                            |
| ISLA DE PASCUA    | -27.1127  | -109.3497  | 1043              | 2.53477E-05     | 1.31538E-05            | 0.000206271 | 0.001721784 | 0.002775709 | 0.000167992 | 6.29967818  | 1.21939E-05                            |
| ISLA MOCHA        | -76.7794  | -147.7334  | 84                | 2.04143E-06     | 1.05936E-06            | 1.66124E-05 | 0.000138667 | 0.000223547 | 1.35295E-05 | 0.050735663 | 9.82063E-07                            |
| LA SERENA         | -358.8324 | -855.0228  | 35861             | 0.000871519     | 0.00045226             | 0.007091123 | 0.059199339 | 0.095435972 | 0.005775977 | 21.65990021 | 0.000419259                            |
| LOS ANGELES       | -34.0522  | -118.2437  | 2                 | 4.86054E-08     | 2.5223E-08             | 3.95534E-07 | 3.3016E-06  | 5.32255E-06 | 3.22131E-07 | 0.001207992 | 2.33824E-08                            |
| MELINKA           | -87.7944  | -147.4856  | 441               | 1.07175E-05     | 5.56166E-06            | 8.72153E-05 | 0.000728003 | 0.001173622 | 7.103E-05   | 0.266362232 | 5.15583E-06                            |
| OSORNO            | -121.7223 | -219.4017  | 33                | 8.01989E-07     | 4.6179E-07             | 6.52631E-06 | 5.44764E-05 | 8.78221E-05 | 5.31517E-06 | 0.019193868 | 3.8581E-07                             |
| OVALLE            | -30.5986  | -71.2008   | 3                 | 7.29081E-08     | 3.78344E-08            | 5.93301E-07 | 4.9524E-06  | 7.98382E-06 | 4.83197E-07 | 0.001811988 | 3.50737E-08                            |
| PICHILEMU         | -68.7732  | -144.0132  | 4                 | 9.72108E-08     | 5.04459E-08            | 7.91068E-07 | 6.6032E-06  | 1.06451E-05 | 6.44263E-07 | 0.002415984 | 4.67649E-08                            |
| PORTO ALEGRE      | -30.0346  | -51.2177   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| PORVENIR          | -266.5115 | -551.833   | 2069              | 5.02823E-05     | 2.60931E-05            | 0.000490918 | 0.003415505 | 0.005506177 | 0.000333245 | 1.249667704 | 2.41891E-05                            |
| PUCÓN             | -39.2821  | -71.9535   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| PUERTO BARRIOS    | 15.7175   | -88.5965   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| PUERTO CARREÑO    | 6.1894    | -67.4858   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| PUERTO MONTT      | -829.434  | -1458.738  | 45058             | 0.001095031     | 0.000568248            | 0.008910986 | 0.074381746 | 0.119911715 | 0.007257298 | 27.21485134 | 0.000526783                            |
| PUNTA ARENAS      | -584.8018 | -780.0881  | 19197             | 0.000466344     | 0.000242499            | 0.003744951 | 0.031677201 | 0.0510672   | 0.00309069  | 11.59007906 | 0.000224343                            |
| QUELÓN            | -603.6898 | -1030.6282 | 20958             | 0.00050931      | 0.000262429            | 0.004144603 | 0.034595815 | 0.055772334 | 0.003374554 | 12.65794397 | 0.000240453                            |
| RÍO CLARO         | -35.1387  | -71.2626   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |
| SALVADOR          | -12.9714  | -38.5014   | 1                 | 2.43027E-08     | 1.26115E-08            | 1.97767E-07 | 1.6508E-06  | 2.66127E-06 | 1.61066E-07 | 0.000063996 | 1.16912E-08                            |

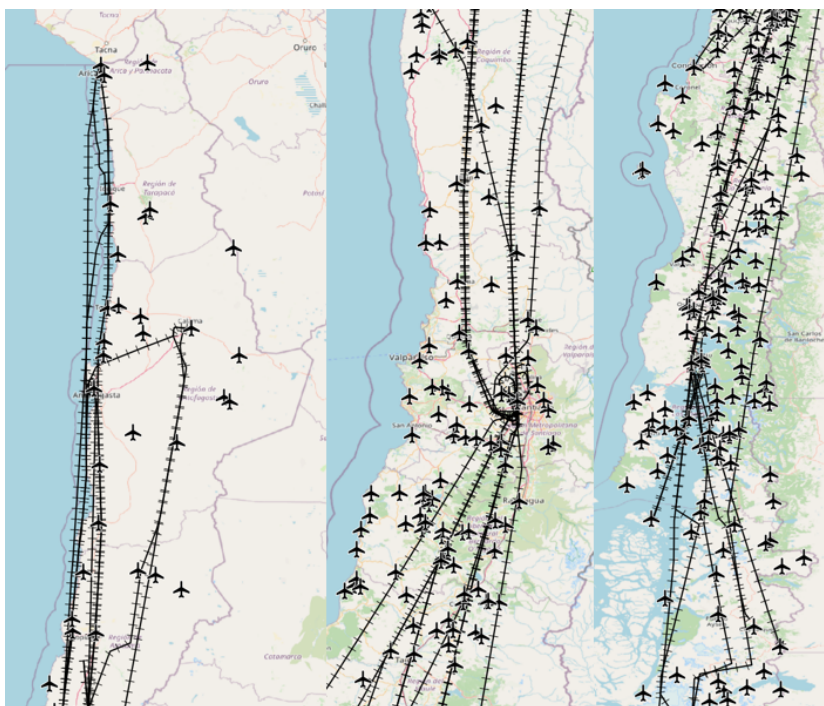


Figura 3.30: Visualización de las rutas aéreas unificadas con toda su información respectiva en la tabla de atributos.

un umbral de validez y todos los modelos implementados lo incluyen como parte de su rutina, realizando internamente este balance y exportando archivos excel para poder corroborar que efectivamente se estén realizando correctamente y no se esté perdiendo información de emisiones en el proceso, esto con el fin de poder asegurar unos resultados precisos y confiables.

Una vez que los modelos espaciales procesaron de forma integrada las bases de datos en formato de hoja de cálculo, las cuales consolidan los inventarios desagregados de emisiones para las etapas de crucero, ascenso y descenso (CCD) junto con las de aterrizaje y despegue (LTO), y cruzaron dicha información espacial con el archivo GeoPackage y las capas vectoriales (shapefiles) correspondientes a la infraestructura y ubicación de los terminales aéreos nacionales, se procedió a la estructuración de los resultados cartográficos definitivos.

El desglose inicial relevante de este procesamiento corresponde a la cuantificación del impacto según la ventana de operación del vuelo. La Figura 3.31 expone la participación porcentual de las fases operacionales para el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), evidenciando de manera clara que la fase de crucero (CCD) concentra el 91.3 % de las emisiones totales generadas en el espacio aéreo nacional, relegando el 8.7 % restante al



ciclo en tierra y bajas altitudes (LTO).

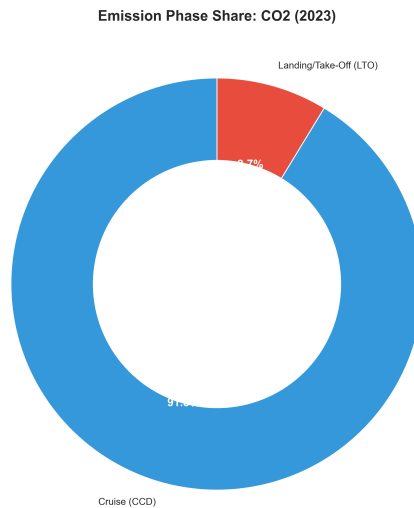


Figura 3.31: Distribución porcentual de emisiones de CO2 por fase operacional (LTO vs. CCD) durante el año 2023.

Esta tendencia de comportamiento se mantiene prácticamente simétrica al evaluar los óxidos de nitrógeno (NOx). Como se constata en la Figura 3.32, la fase CCD alcanza un 91.2 % de representatividad frente a un 8.8 % correspondiente a la fase LTO. La paridad entre ambos gráficos demuestra estadísticamente que el consumo de combustible bajo regímenes estables de altitud es el vector predominante en el volumen del inventario atmosférico total, sin verse afectado significativamente por las variaciones dinámicas del empuje de los motores en las maniobras cercanas a los aeropuertos.

Al segmentar la información con el fin de identificar la procedencia y los flujos específicos de estas emisiones, los histogramas de ordenamiento jerárquico revelan un fenómeno de centralización estructural muy marcado en torno a la Región Metropolitana, como era de esperarse. En el análisis del CO2 expuesto en la Figura 3.33, los pares de rutas comerciales Antofagasta–Santiago e Iquique–Santiago lideran ampliamente el aporte en la fase de crucero, registrando valores que rozan los 500 Gg cada uno. En el sector sur, la ruta Puerto Montt–Santiago se posiciona inmediatamente después con un volumen aproximado de 350 Gg.

En contraposición, al examinar exclusivamente los focos fijos de la fase LTO (gráfico derecho de la Figura 3.33), el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (SCEL) destaca de manera exponencial sobre la red regional con un registro histórico de 153.9 Gg de CO2. Los terminales alternos de regiones como Antofagasta (SCFA), Puerto

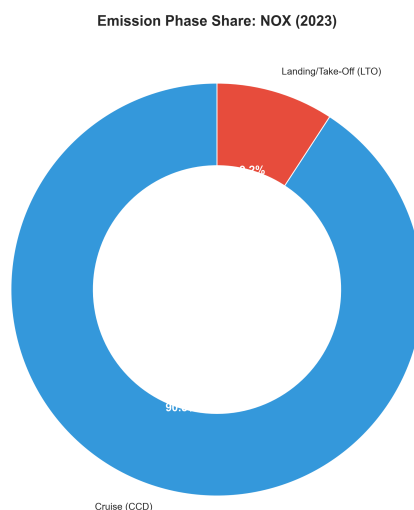


Figura 3.32: Distribución porcentual de emisiones de NOx por fase operacional (LTO vs. CCD) durante el año 2023.

Montt (SCPM) y Caldera (SCAT) exhiben valores marcadamente menores y estables entre sí, fluctuando en un rango estrecho que va desde los 26.2 Gg hasta los 28.2 Gg.

Este orden de magnitud e influencia geográfica se replica de manera análoga en la distribución del NOx detallada en la Figura 3.34. Los trayectos de conexión con las zonas mineras del norte grande vuelven a constituir el núcleo crítico en régimen de crucero, con aportes individuales que superan los 2.0 Gg de NOx. Paralelamente, el nodo de Santiago (SCEL) revalida su condición de hotspot principal en superficie al concentrar 0.7 Gg del compuesto reactivo durante los ciclos de aproximación y rodaje, mientras que los terminales de apoyo regionales no sobrepasan el umbral de los 0.1 Gg.

La expresión espacial de los datos tabulares procesados toma forma definitiva al proyectarse sobre la grilla cartográfica bajo un modelo de intensidad logarítmica. Las Figuras 3.35, 3.36 y 3.37 grafican de manera secuencial la huella del CO2 a lo largo de la angosta fisonomía del territorio chileno. En el mapa acotado a la fase LTO (presente en la Figura 3.35), las emisiones quedan confinadas estrictamente a nodos discretos y aislados que coinciden de manera exacta con las coordenadas geográficas de las pistas de aterrizaje de cada aeropuerto analizado. El tamaño de los anillos de dispersión verdes delinea con fidelidad la desproporción existente entre el terminal de la capital y el resto de aeropuertos.

Por otro lado, la cartografía de la fase CCD (Figura 3.36) transforma estos puntos en corredores de tránsito lineal continuo, dibujando los vectores aéreos preferenciales del

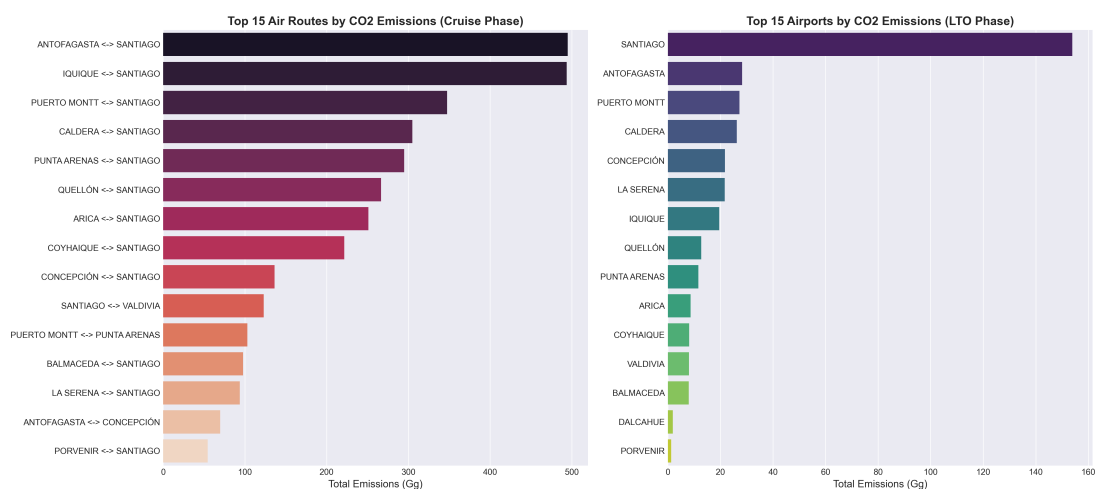


Figura 3.33: Jerarquización de las 15 principales rutas aéreas en crucero y los 15 aeropuertos con mayor impacto en la fase LTO para emisiones de CO2.

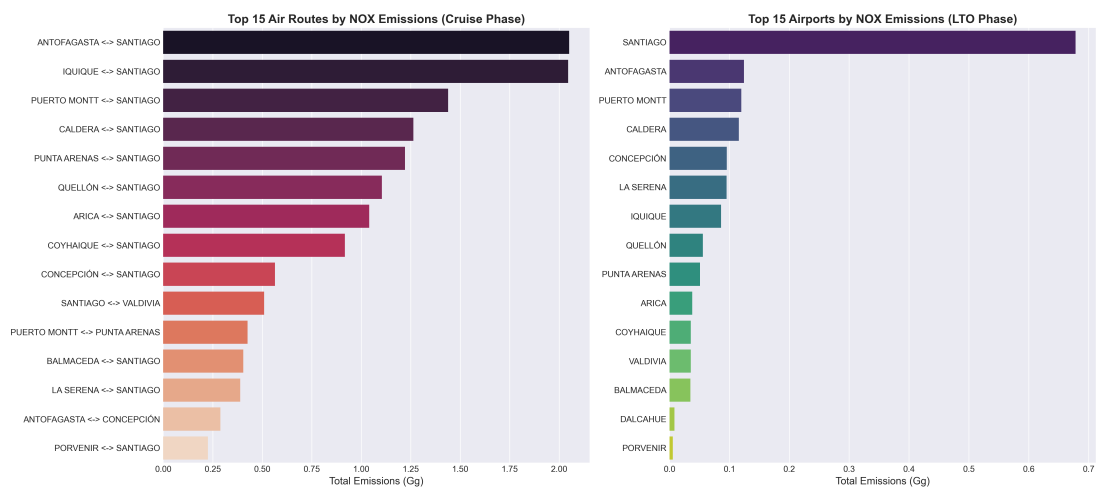


Figura 3.34: Jerarquización de las 15 principales rutas aéreas en crucero y los 15 aeropuertos con mayor impacto en la fase LTO para emisiones de NOx.



país. La densidad de la intensidad lumínica corrobora visualmente que el tramo norte-centro actúa como la principal arteria de circulación atmosférica de contaminantes. La integración de ambas dinámicas queda consolidada en el mapa de fase total (Figura 3.37), que entrega una visión holística del impacto del sector aeronáutico.

Por otro lado, el comportamiento cartográfico para los óxidos de nitrógeno se encuentra ilustrado en las Figuras 3.38, 3.39 y 3.40. La visualización de la fase en superficie (Figura 3.38) es clave para las evaluaciones de impacto ambiental local, ya que sitúa geográficamente las descargas operacionales de NOx en las inmediaciones de los centros urbanos adyacentes a las zonas de aproximación aérea, zonas propensas a fenómenos de reactividad fotoquímica.

La representación de los tramos en ruta (Figura 3.39) y la superposición total final (ver Figura 3.40) vuelven a calcar el eje longitudinal de la geografía del país, confirmando de manera concluyente que la condición lineal del territorio nacional obliga a concentrar y canalizar la totalidad del inventario de emisiones aéreas en autopistas atmosféricas sumamente acotadas y geográficamente predecibles.

Para corroborar la solidez del algoritmo en términos de discriminación territorial y granularidad matemática, resulta indispensable examinar la cartografía de alta resolución obtenida mediante la discretización de las trayectorias en una grilla regular. La Figura 3.41 ilustra este nivel de desagregación espacial a escala microestructural, dividiendo los flujos de tránsito en pasillos cuadriculados que capturan fielmente el comportamiento físico de las aeronaves en el espacio aéreo intermedio y bajo.

A diferencia de las representaciones anteriores que suavizan los trayectos mediante líneas vectoriales continuas de carácter puramente ilustrativo, este enfoque de pixelación y visualización en sistemas de información geográfica rasterizada permite aislar el impacto atmosférico celda por celda, demostrando el correcto cruce de las rutas aéreas con la grilla base INEMA según la metodología y procedimientos anteriormente explicados. En las secciones ampliadas de la Figura 3.41, enfocadas en el nodo de la zona central del país, se aprecian de forma nítida no solo las trayectorias de aproximación directa y salida, sino también las maniobras geométricas complejas y recurrentes. Esto incluye los giros de alineación, pasillos de descenso escalonado y los patrones de espera o circuitos de hipódromo ejecutados sobre la vertical de las regiones Metropolitana y de Valparaíso durante las horas de congestión de tráfico.

El aspecto metodológico más crítico que convalida este procesamiento es la escala de intensidad calibrada en la leyenda del modelo, donde la banda de cuantificación para el CO2 anual totalizado registra un límite superior de casi 154 Gg. Como se

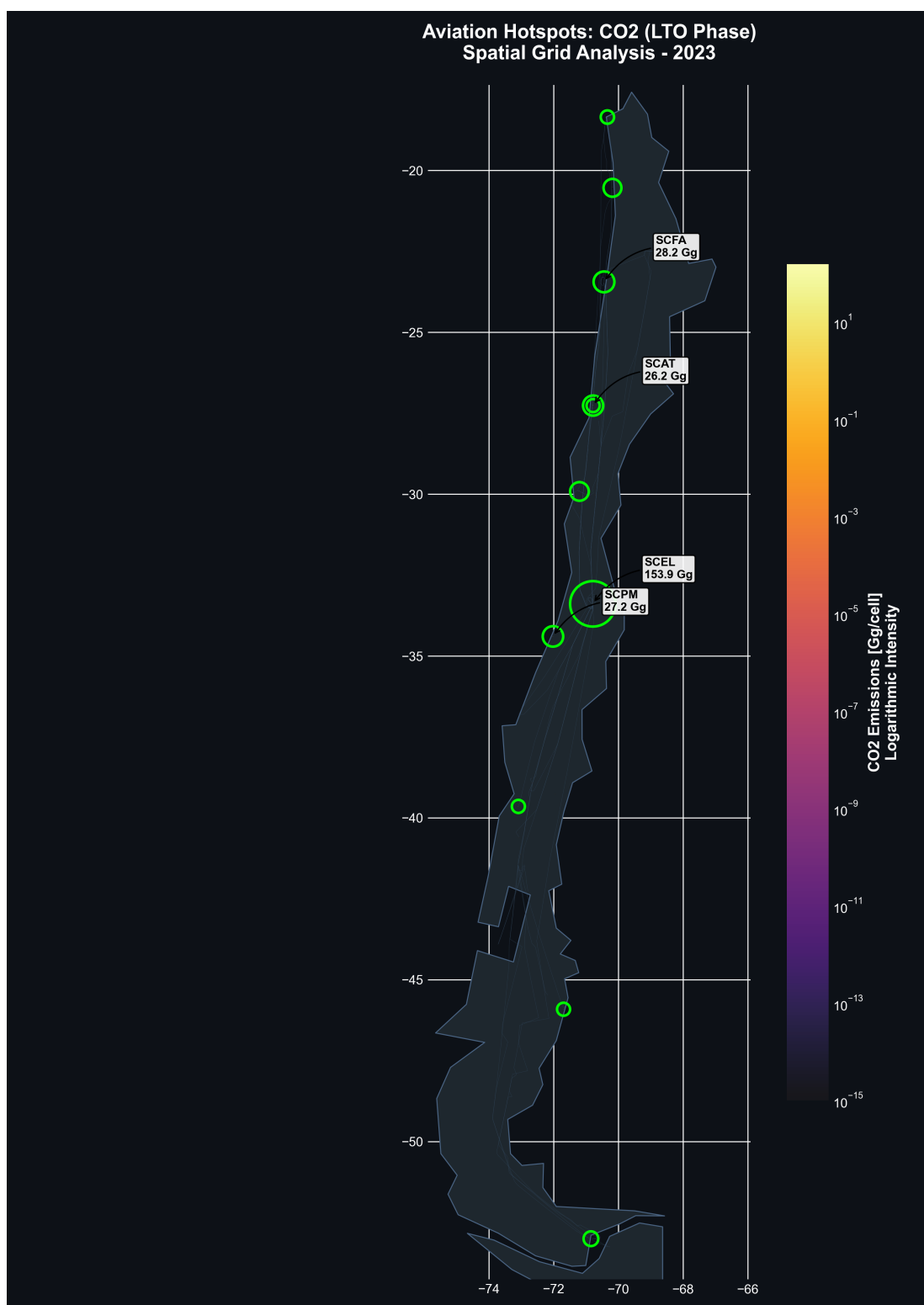


Figura 3.35: Distribución espacial de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Chile para la fase de aterrizaje y despegue (LTO) durante el año 2023.

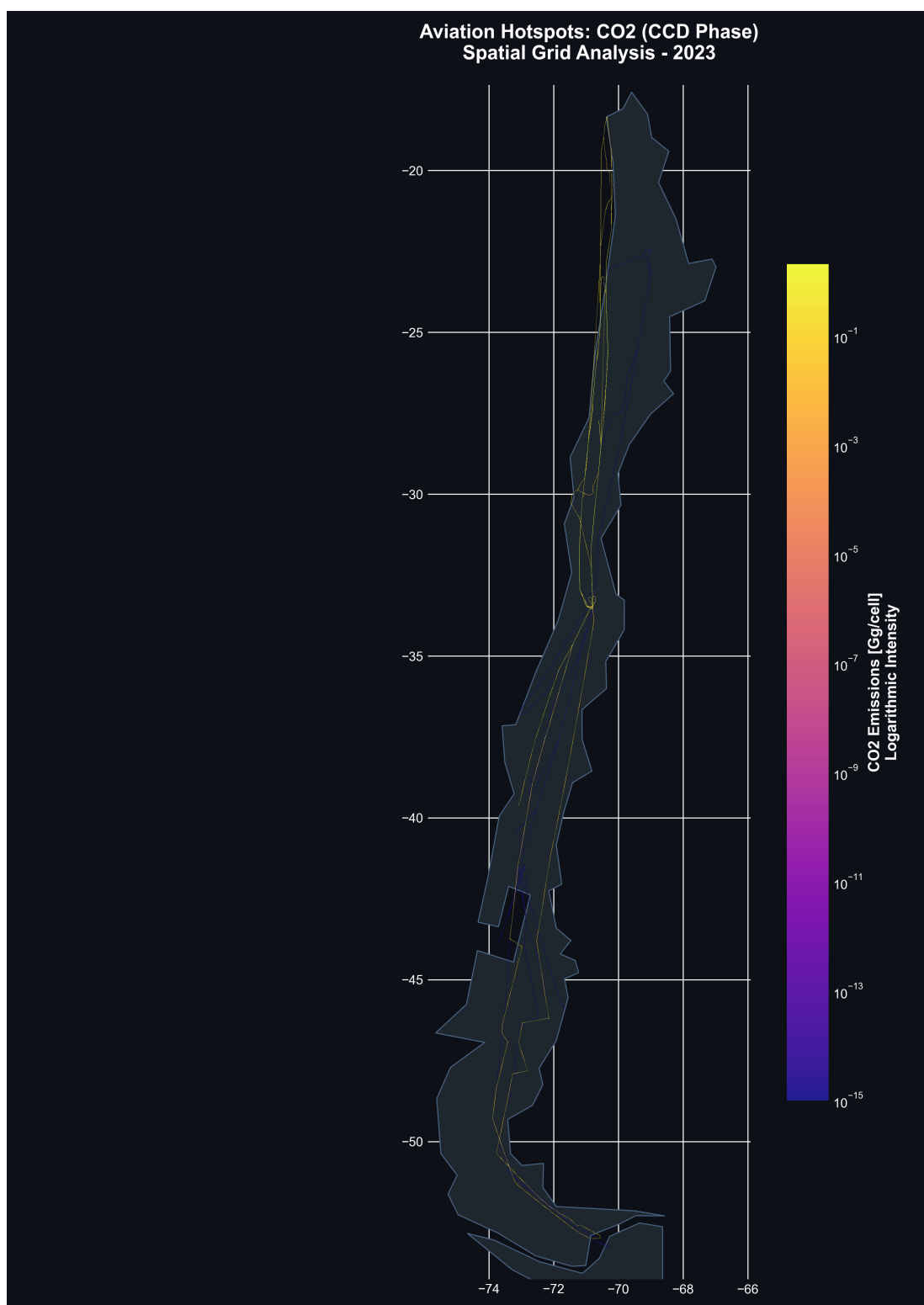


Figura 3.36: Distribución espacial de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Chile para la fase de crucero, ascenso y descenso (CCD) durante el año 2023.

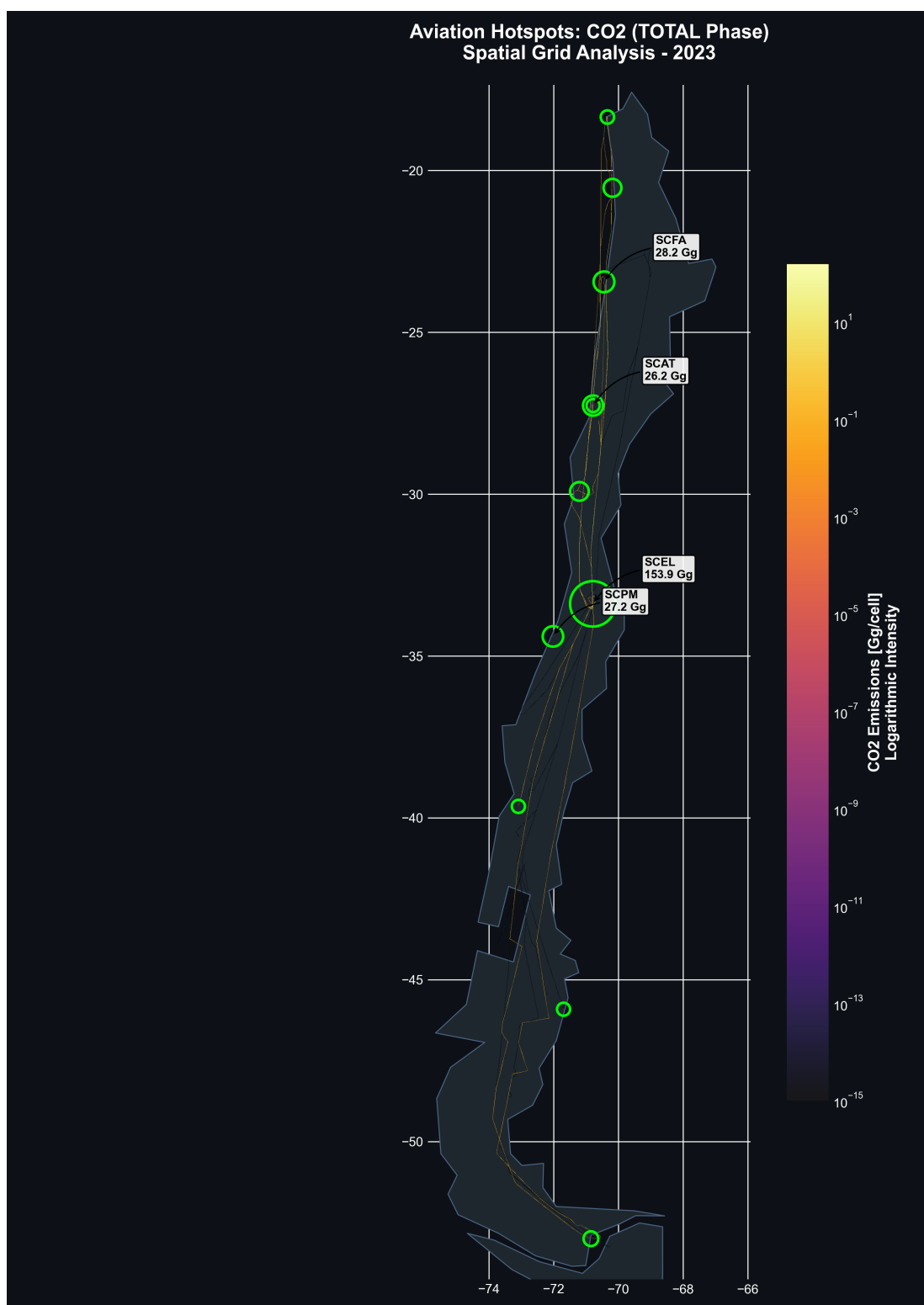


Figura 3.37: Distribución espacial integrada de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en el territorio nacional para el periodo 2023.

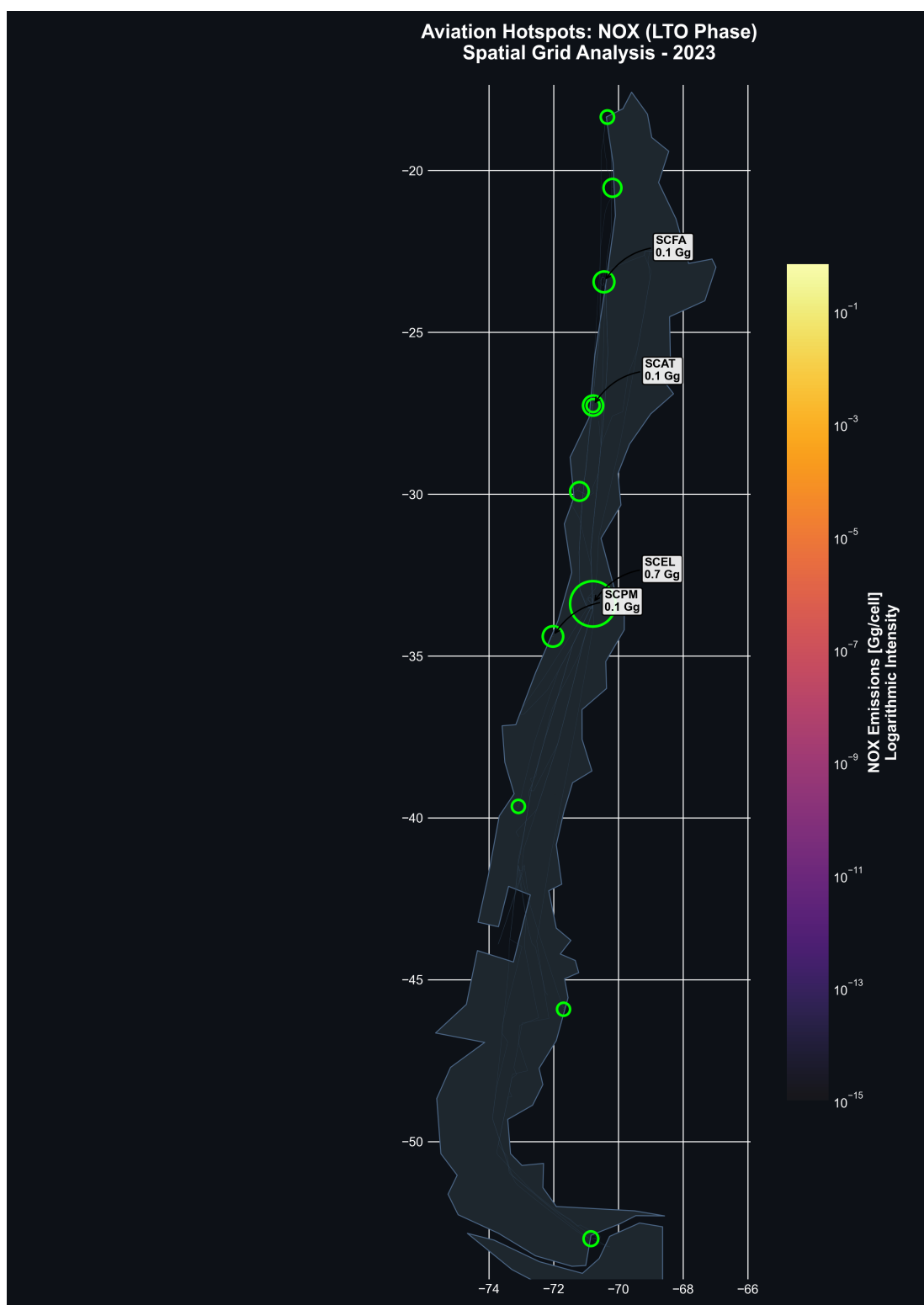


Figura 3.38: Distribución espacial de las emisiones de NO<sub>x</sub> en Chile para la fase de aterrizaje y despegue (LTO) durante el año 2023.

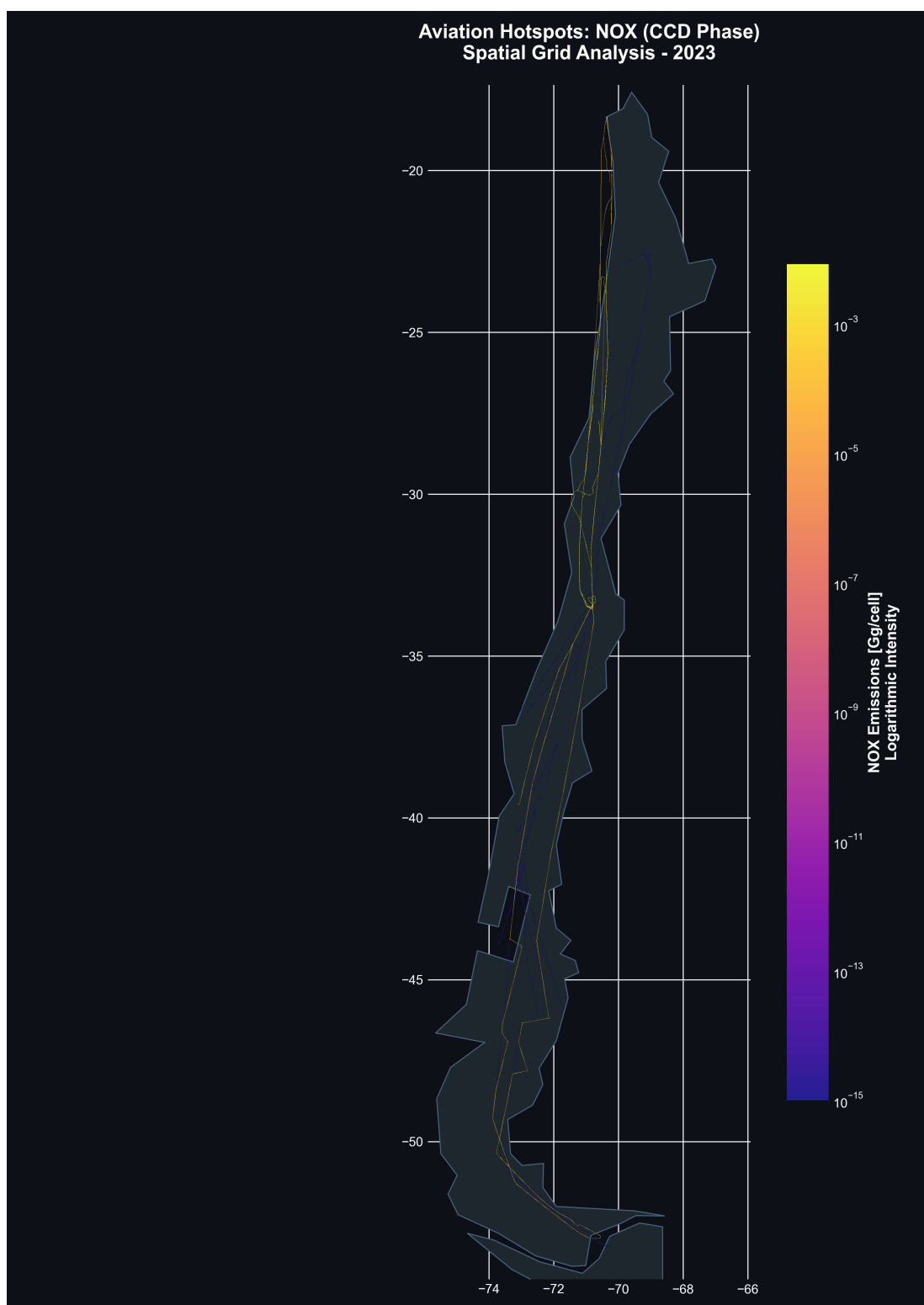


Figura 3.39: Distribución espacial de las emisiones de NOx en Chile para la fase de crucero, ascenso y descenso (CCD) durante el año 2023.

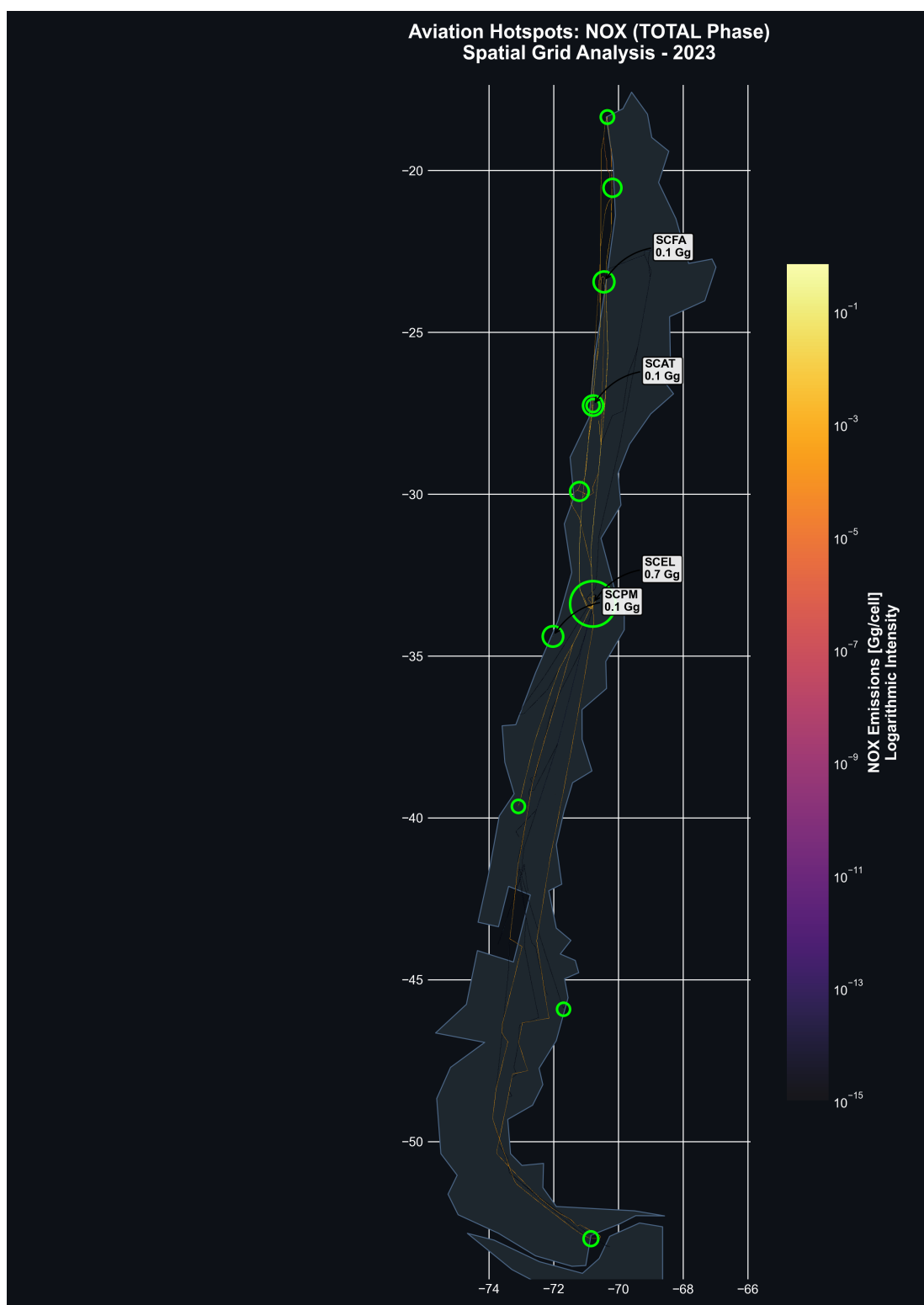


Figura 3.40: Distribución espacial integrada de las emisiones totales de NOx en el territorio nacional para el periodo 2023.

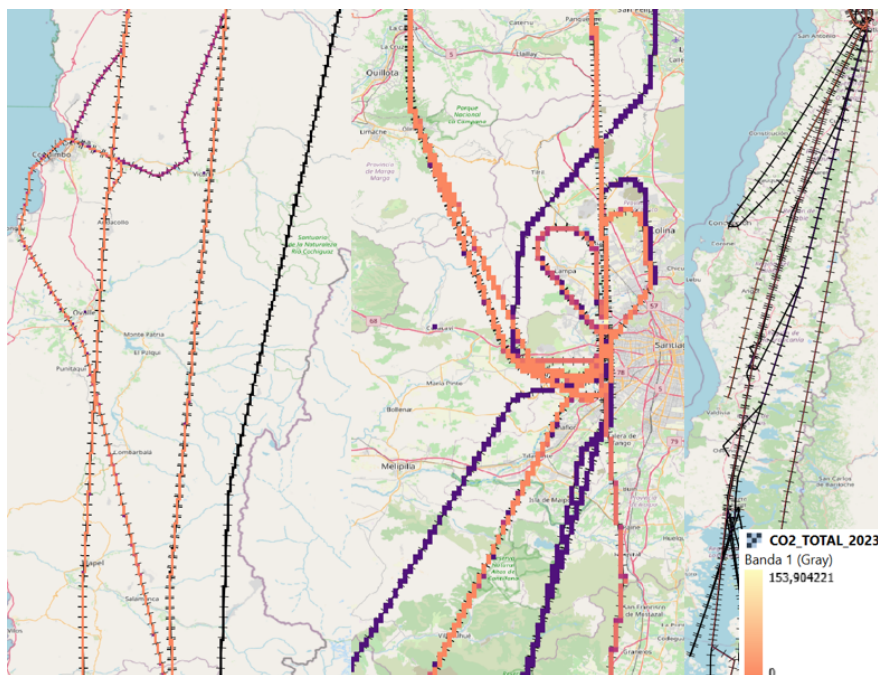


Figura 3.41: Detalle cartográfico de alta resolución espacial para la desagregación de rutas aéreas y celdas de emisión de CO2 durante el periodo 2023.

evidencia en el mapa de calor indexado, este valor extremo, el cual está codificado en el matiz amarillo de máxima iluminación, no se diluye de manera genérica a lo largo de los corredores de cruce, sino que colapsa de forma exclusiva y particular dentro del píxel unitario que encierra el perímetro operativo del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez. Dicha concentración puntual en una única celda responde al solapamiento tridimensional de los ciclos LTO. Al converger en ese punto geográfico específico la totalidad de las operaciones de rodaje en plataforma, las aceleraciones en pista y los gradientes de ascenso inicial de toda la flota nacional, el modelo confina correctamente la carga contaminante masiva en el origen. Esto demuestra de manera concluyente la sensibilidad y exactitud del algoritmo desarrollado, el cual es capaz de simular fenómenos de saturación local severa sin incurrir en errores de dispersión numérica artificial hacia las cuadrículas colindantes rurales o deshabitadas, garantizando así un inventario espacialmente representativo para evaluaciones de calidad del aire a nivel de superficie.

Ahora bien, las emisiones aeronáuticas se estructuran como vectores lineales discretos de conectividad interregional que surcan el espacio aéreo continental y oceánico, presentando un comportamiento de concentración nodal masiva en las inmediaciones



de la infraestructura aeroportuaria nacional.

A continuación, se presentan nuevos resultados cartográficos obtenidos tras el proceso de desagregación espacial y cambiando la leyenda y escala de colores empleada para el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en sus tres macrozonas de análisis (Figuras 3.42, 3.43 y 3.44), seguidos por las correspondientes mapas de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) bajo la misma delimitación geográfica (Figuras 3.45, 3.46 y 3.47).

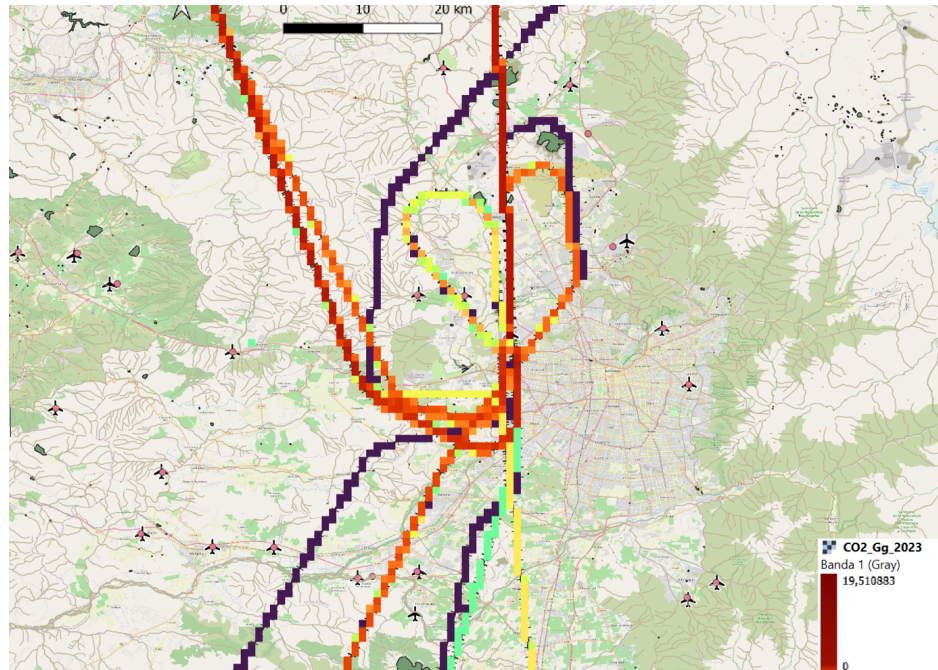


Figura 3.42: Desagregación espacial de emisiones aéreas de  $CO_2$  (Gg) en la zona central de Chile para el año 2023.

El examen de la distribución espacial del  $CO_2$  permite identificar de manera directa la densidad física de las aerovías comerciales del país. La nueva escala geométrica empleada para las emisiones de este gas de efecto invernadero alcanza un valor crítico de celda de 19,510883 Gg. En la zona central (Figura 3.42), este umbral máximo se alcanza lógicamente en las coordenadas de emplazamiento del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (AMB). La morfología de las trazas sobre Santiago evidencia los patrones de aproximación y las maniobras de espera estandarizadas, visibles como bucles elípticos de tonalidad naranja y amarilla que circundan el núcleo urbano antes de la alineación final con las pistas de aterrizaje. Este fenómeno responde directamente a la acumulación de ciclos de despegue y aterrizaje (LTO) como se había mencionado con anterioridad, fase operativa donde el consumo de combustible por unidad de tiempo

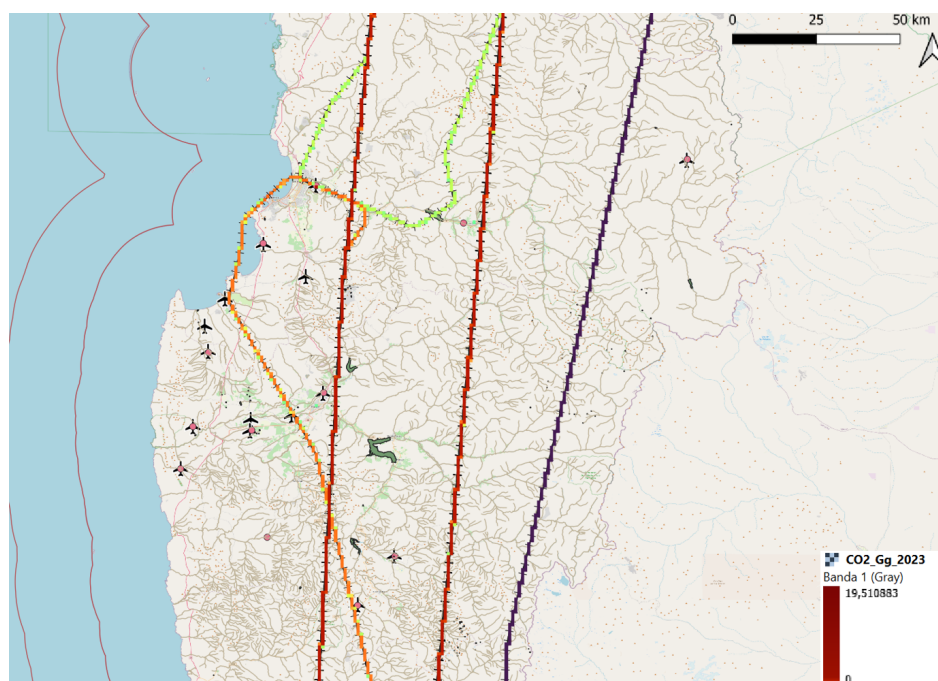


Figura 3.43: Desagregación espacial de emisiones aéreas de  $CO_2$  (Gg) en la zona norte de Chile para el año 2023.

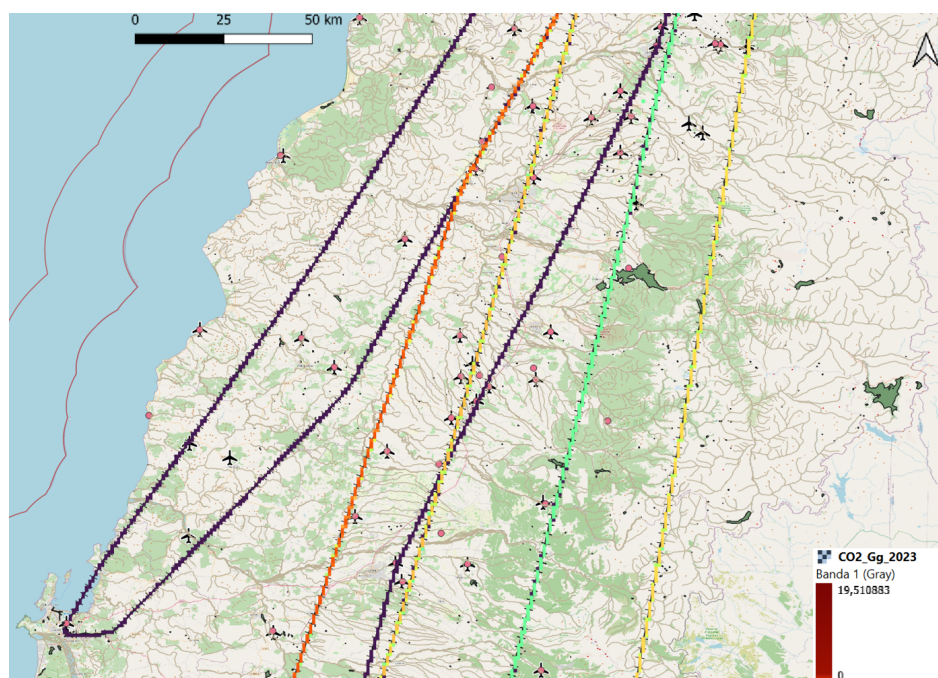


Figura 3.44: Desagregación espacial de emisiones aéreas de  $CO_2$  (Gg) en la zona sur de Chile para el año 2023.

es considerable.

En el norte del país (Figura 3.43), el inventario espacializado se descompone en corredores longitudinales paralelos bien definidos. Destacan dos rutas principales de alta densidad que enlazan la Región Metropolitana con los terminales aéreos de las capitales mineras (como Calama, Antofagasta e Iquique), representadas en la cartografía con coloraciones que varían entre el rojo y el naranja profundo. Las trazas periféricas de menor impacto y frecuencia operativa decaen hacia niveles de emisión expuestos por tonalidades más verdes/amarillas y morado, lo que denota rutas secundarias o de tránsito bajo y a altitudes de crucero estables donde la huella de emisión por celda es menor.

Por su parte, la proyección hacia la zona sur (Figura 3.44) ilustra de igual manera la dispersión de los flujos aéreos a medida que se aproximan a la Patagonia chilena. Se constata la bifurcación de las aerovías troncales que conectan centros urbanos intermedios y terminales australes. Las intensidades cromáticas expuestas en este cartografía y que corresponden a esta macrozona se concentran predominantemente en rangos intermedios y bajos a lo largo de los tracks de vuelo, a excepción de los puntos de origen norte donde la convergencia de tráfico mantiene vectores de emisión considerables.

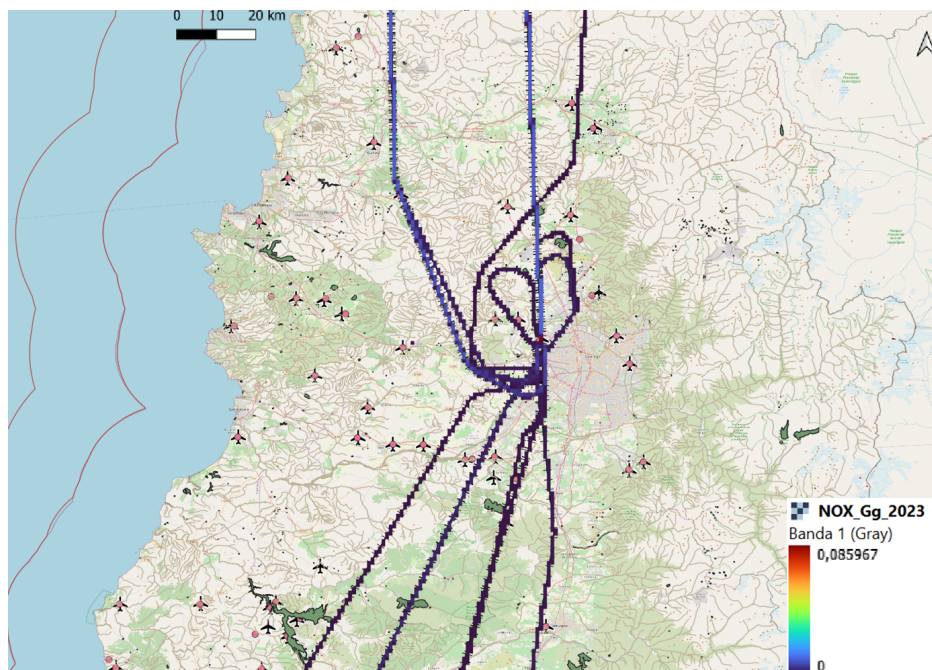


Figura 3.45: Desagregación espacial de emisiones aéreas de  $NO_x$  (Gg) en la zona central de Chile para el año 2023.



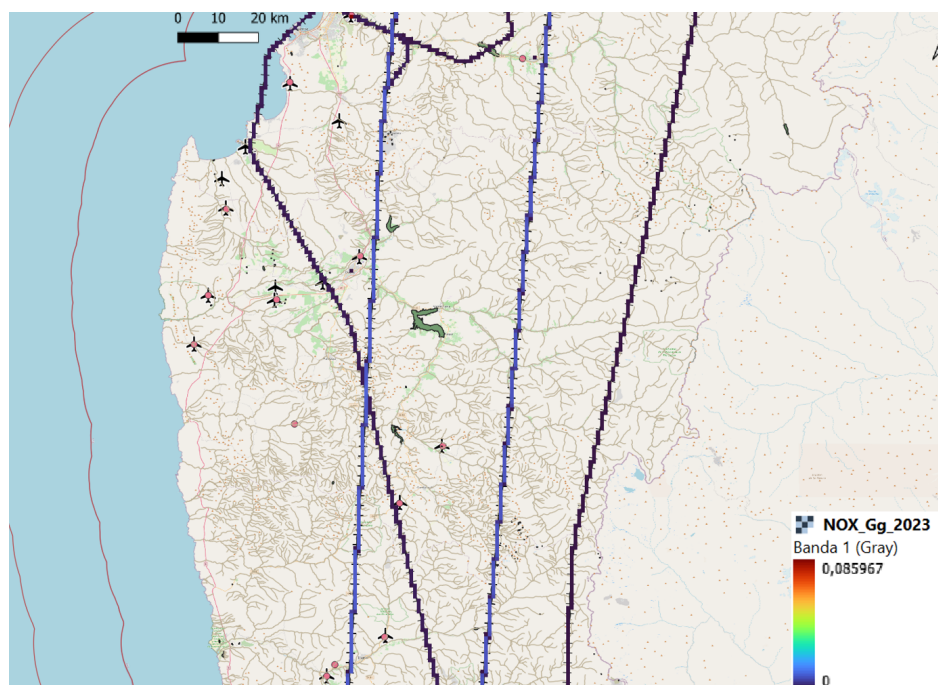


Figura 3.46: Desagregación espacial de emisiones aéreas de  $NO_x$  (Gg) en la zona norte de Chile para el año 2023.

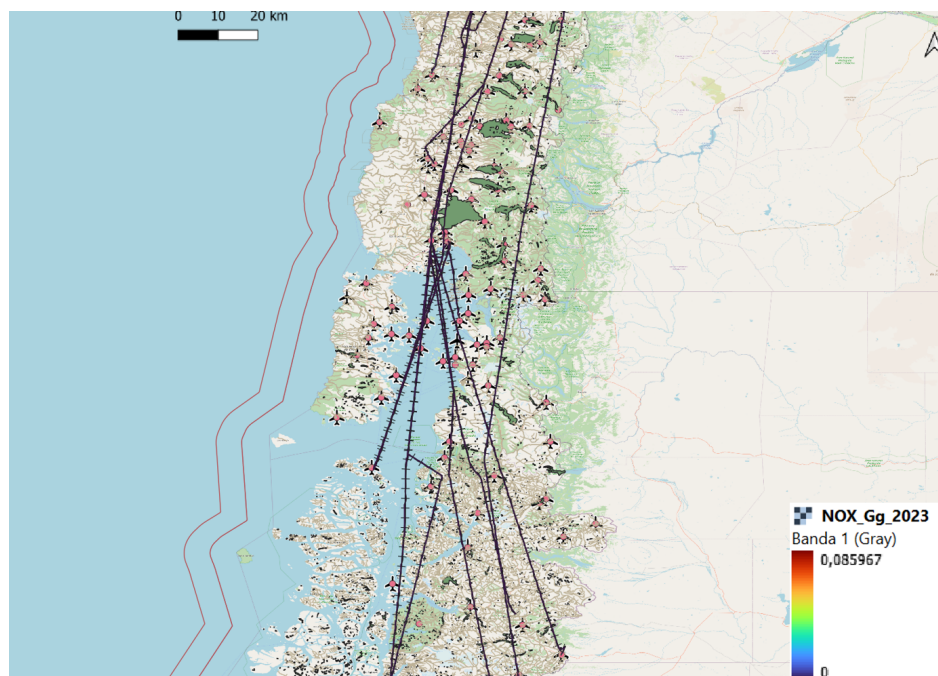


Figura 3.47: Desagregación espacial de emisiones aéreas de  $NO_x$  (Gg) en la zona sur de Chile para el año 2023.

Por su parte, al evaluar el comportamiento de los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), cuyos mapas se exponen en las Figuras 3.45, 3.46 y 3.47, se ratifica una correspondencia geométrica absoluta respecto a las trayectorias del  $CO_2$ , explicada por el hecho de que ambos contaminantes comparten la misma fuente móvil indexada por los planes de vuelo. No obstante, la escala de magnitud discreta difiere sustancialmente debido a las propiedades químicas y factores de emisión del proceso de combustión a altas presiones y temperaturas en los motores de aviación, fijando un techo máximo de celda de 0,085967 Gg de  $NO_x$ .

La focalización urbana en la zona central (Figura 3.45) vuelve a evidenciar el peso relativo del principal aeropuerto del país dentro del inventario nacional. El punto de intersección común de todas las trayectorias de descenso se tiñe de un color rojo puntual lo cual es signo de la tasa de emisión local correspondiente al aeropuerto de Santiago. En los mapas correspondientes a los extremos geográficos norte y sur (Figuras 3.46 y 3.47), las líneas de tránsito regular se presentan mayoritariamente en tonalidades azuladas oscuras, lo que indica valores cercanos al límite inferior de la escala de desagregación en tramos de ruta abierta. Esto demuestra que la generación sustancial de  $NO_x$  se restringe casi exclusivamente a las inmediaciones de las cabeceras de pista y zonas de aproximación inmediata, donde los requerimientos de empuje del motor incrementan la firma térmica de la combustión y, por ende, la fijación de nitrógeno atmosférico.

### **3.2.2. Caracterización y Dominancia de la Flota Comercial**

La caracterización de la flota de aeronaves es un factor fundamental para comprender a cabalidad la matriz de emisiones y el consumo de combustible del tráfico aéreo nacional. El perfil tecnológico, el peso al despegue y la eficiencia térmica de los motores varían sustancialmente entre los distintos modelos, por lo que identificar los equipos predominantes resulta crítico para el modelado ambiental.

Al evaluar la distribución de las operaciones según el tipo de aeronave, se observa una profunda estandarización técnica orientada a equipos de fuselaje estrecho (*narrow-body*). Como se evidencia en el diagrama de Pareto presentado en la figura 3.48, el volumen de ciclos LTO está fuertemente concentrado en muy pocos modelos. El Airbus A320 por sí solo ejecuta más de 175.000 operaciones en el periodo analizado, y en conjunto con su variante de mayor capacidad, el A321, sobrepasan holgadamente el umbral acumulado del 80 % de la actividad aérea total del país.

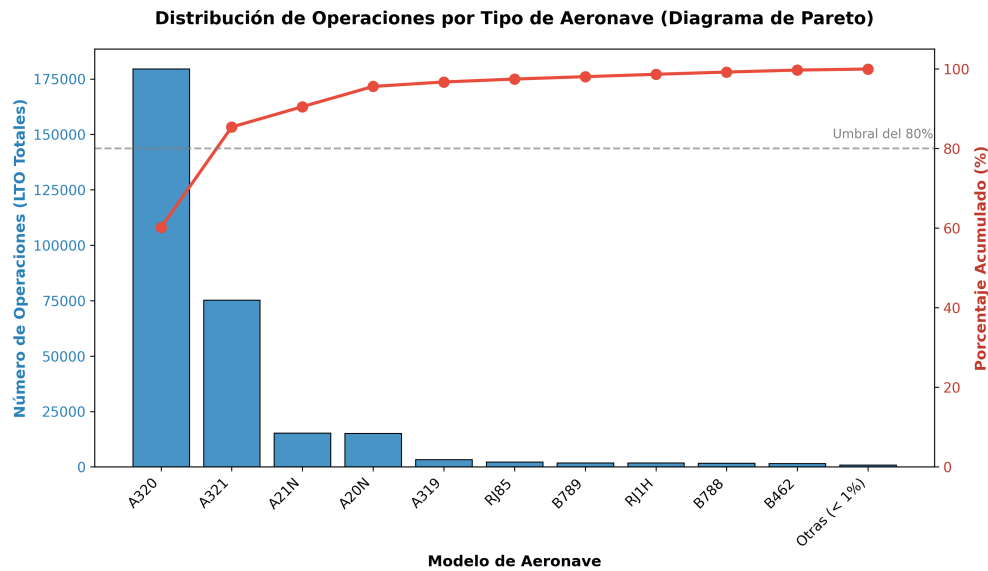


Figura 3.48: Diagrama de Pareto de las operaciones (ciclos LTO) por modelo de aeronave. Se evidencia que apenas dos modelos concentran más del 80 % del tráfico nacional.

Para visualizar con mayor precisión esta asimetría y el peso relativo de cada equipo, la figura 3.49 desglosa la estructura del parque aeronáutico en operaciones mediante un mapa de árbol (*treemap*). El gráfico ratifica la hegemonía operativa de una única familia de aeronaves comerciales. Equipos de doble pasillo diseñados para rutas intercontinentales (como los Boeing 789 y 788) o jets de carácter regional (como el RJ85 y RJ1H) quedan relegados a participaciones marginales en la frecuencia de vuelos internos, registrando incidencias individuales inferiores al 1 %.

Esta consolidación del mercado queda expuesta de forma definitiva al analizar el subconjunto de los cinco modelos más utilizados, que agrupan la inmensa mayoría de las 298.306 operaciones totales registradas. Tal como detalla la figura 3.50, el mercado doméstico es un monopolio técnico de la familia Airbus. Las variantes clásicas (CEO) A320 y A321 lideran de manera absoluta con un 60,2 % y 25,2 % de cuota, respectivamente. A esto se suma la progresiva inserción de sus versiones de nueva generación y mayor eficiencia motriz (NEO), representadas por el A21N (5,1 %) y el A20N (5,1 %). Esta uniformidad en la flota simplifica la logística de mantenimiento de las aerolíneas, pero al mismo tiempo define un perfil de emisiones altamente estandarizado en la red nacional.

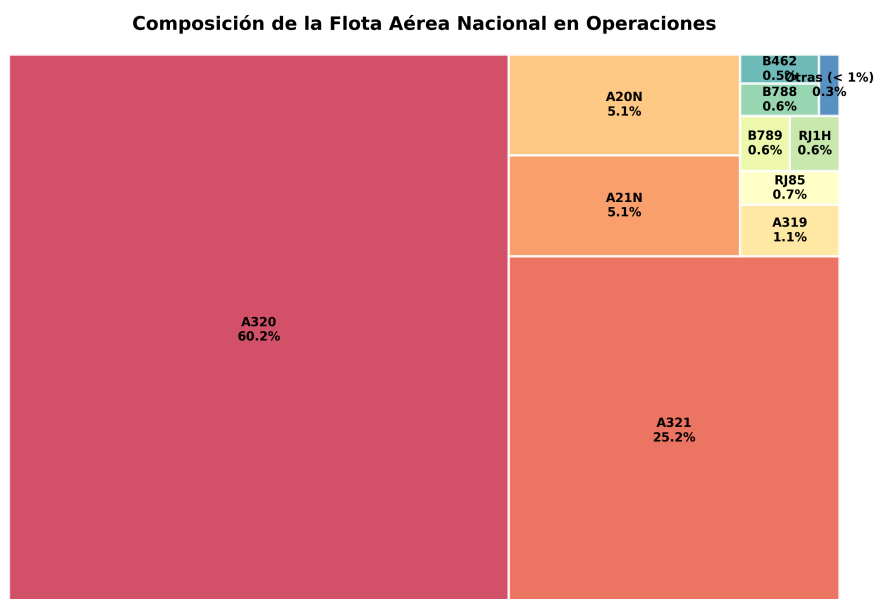


Figura 3.49: Composición porcentual de la flota aérea nacional en operaciones. El área de cada bloque es proporcional a la cuota de mercado del modelo respectivo.

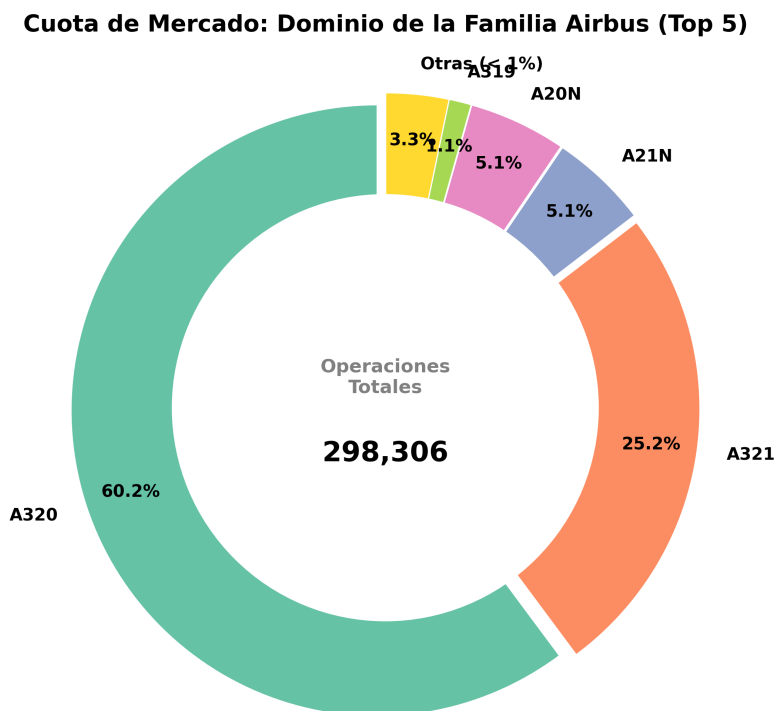


Figura 3.50: Cuota de mercado operativa destacando el dominio de la familia Airbus. Los cinco modelos principales, todos pertenecientes al mismo fabricante, conforman más del 96 % de los despegues y aterrizajes.

### 3.2.3. Modelación Tridimensional

Para ser exactos, la comprensión de la dispersión de contaminantes atmosféricos en el sector aeronáutico requiere incorporar de manera explícita la dimensión altitudinal, superando las limitaciones restrictivas de las representaciones bidimensionales en superficie. Al modelar las trayectorias completas de vuelo desde la cota cero hasta la altitud en la que operan las aeronaves, la cual se encuentra en la tropopausa y es a los 11,000 metros de altitud aproximadamente, es posible mapear con precisión la transición física entre los ciclos de despegue y aterrizaje (LTO) y las operaciones de crucero, ascenso y descenso (CCD).

Bajo este enfoque, se implementó una plataforma de renderizado numérico tridimensional para evaluar la distribución espacial de los distintos contaminantes analizados. A modo de ejemplificar esto, aquí se presenta la distribución espacial de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) generados por la aviación comercial durante el año base 2023, cuyos resultados de dispersión y concentración estructural se exponen a continuación.

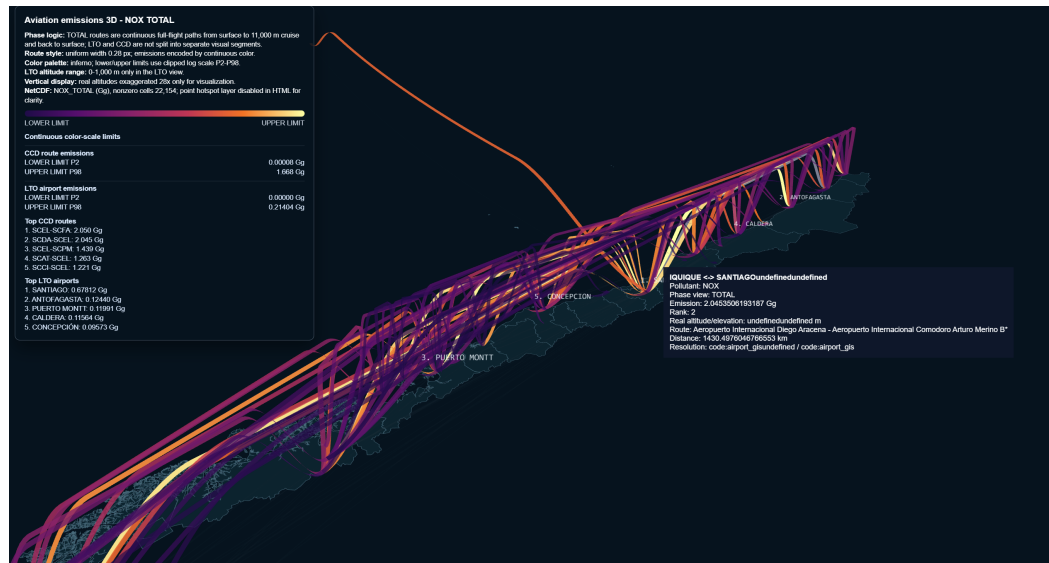


Figura 3.51: Visualización tridimensional de las trayectorias integradas de emisión de  $\text{NO}_x$  total para el transporte aéreo nacional (año 2023).

La distribución de los vectores cinemáticos desplegados en la Figura 3.51 ratifica la fuerte centralización del espacio aéreo chileno, donde el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (SCEL) opera como el núcleo de convergencia de la red de transporte.

De acuerdo con las métricas extraídas de la simulación, las rutas de largo alcance



que conectan la Región Metropolitana con las zonas mineras del norte registran la mayor descarga de masa contaminante en fase de cruce (CCD), lo cual era de esperarse. La ruta Santiago-Antofagasta (SCEL-SCFA) lidera el inventario con 2,050 Gg de  $\text{NO}_x$ , seguida inmediatamente por el corredor Iquique-Santiago (SCDA-SCEL), que alcanza los 2,045 Gg a lo largo de sus 1430,5 km de trayectoria.

Finalmente, en la componente superficial, el análisis de los ciclos LTO refleja un comportamiento análogo pero geoméricamente confinado, ya que el terminal de Santiago concentra un valor crítico de 0,678 Gg, cifra que supera de manera sustancial a los aeropuertos de Antofagasta (0,124 Gg) y Puerto Montt (0,119 Gg). Esta asimetría espacial corrobora que, si bien el impacto en superficie se focaliza severamente en la región metropolitana, la inyección neta de precursores en la tropopausa se distribuye como fuentes lineales continuas que siguen estrictamente las rutas simuladas, las cuales a su vez siguen la orientación geográfica de la costa y los valles interiores de la macrozona norte y centro-sur.

### 3.3. Transporte Marítimo

En lo que respecta al transporte marítimo, de forma análoga a los demás modos de transporte analizados en este estudio, la desagregación espacial de sus emisiones está estrictamente vinculada y es totalmente dependiente a la estructuración previa de los modelos matemáticos de estimación y cálculo preciso de estas emisiones. Este proceso analítico se fundamenta de manera rigurosa en el marco conceptual y procedimental expuesto anteriormente y detalladamente en la sección correspondiente a la metodología de cálculo para el sector naval. Dentro de este marco, la determinación de los inventarios atmosféricos se segmenta operacionalmente en tres fases críticas, las cuales son puerto (*hotelling*), maniobra y crucero. Esta diferenciación resulta fundamental en términos de modelación, puesto que cada etapa parametriza de manera independiente los tiempos de operación, las potencias nominales de los sistemas de propulsión y auxiliares, y los factores de carga específicos asociados dinámicamente al tipo de embarcación.

De la misma manera, los factores de emisión exhiben una alta variabilidad temporal y química. Estos coeficientes no solo divergen en función del contaminante que se esté analizando, sino que también responden a actualizaciones cronológicas derivadas de innovaciones tecnológicas o exigencias normativas internacionales aplicadas en años específicos, afectando de manera asincrónica a la matriz de compuestos. Este dinamismo operacional exige un exhaustivo levantamiento, depuración y cruce de datos tabulares indexados según el contaminante objetivo. A modo de ejemplo y para explicar esta complejidad estructural, se presentará más adelante el comportamiento histórico de los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), dado que durante el año 2020, entró en vigor la normativa de la Organización Marítima Internacional (OMI) que limitó drásticamente el contenido de azufre en los combustibles marinos, reduciéndolo del 3.5 % al 0.5 %, lo que propició una contracción sin precedentes en las tasas de emisión locales y globales de este compuesto. Los efectos de estas variables operacionales y regulatorias se analizan en profundidad a continuación, mediante la exposición de los resultados globales y su consecuente desagregación cartográfica de alta resolución.

Para materializar el cálculo de los inventarios de emisiones del sector marítimo, el modelo exige en primera instancia la estructuración de una base de datos paramétrica que caracterice fielmente el perfil operativo de la flota. La Tabla 3.1 consolida las variables independientes ingresadas al algoritmo, desglosadas por categoría de embarcación. Este conjunto de datos define la potencia nominal instalada, la cual se presenta tanto para

motores principales (ME) como auxiliares (AE), y los tiempos medios de residencia en las distintas subfases operativas: fondeo, maniobra y estadía. Adicionalmente, se establecen los factores de carga (LF) que modelan la fracción de potencia efectivamente utilizada en cada etapa, evidenciando, por ejemplo, la baja exigencia del motor principal durante la estadía (1 %) en contraste con la carga sostenida de los equipos auxiliares.

Tabla 3.1: Parámetros de entrada y valores de referencia operativos por categoría de embarcación.

| Categoría             | Nº Recal. | ME (kW) | AE (kW) | t_fondeo (h) | t_man (h) | t_est (h) | LF_fondeo_ME | LF_fondeo_AE | LF_man_ME | LF_man_AE | LF_est_ME | LF_est_AE |
|-----------------------|-----------|---------|---------|--------------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Contenedores (PTC)    | 1,809     | 25,000  | 6,000   | 6            | 2.5       | 53.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Graneleros            | 1,596     | 8,800   | 2,200   | 12           | 2.5       | 85.1      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Petroleros            | 1,232     | 10,100  | 2,828   | 10           | 2.5       | 55.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Carga General         | 960       | 4,800   | 917     | 10           | 2.5       | 49.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Químicos              | 777       | 8,200   | 1,730   | 12           | 2.0       | 46.8      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Gaseros               | 73        | 12,000  | 2,664   | 8            | 2.5       | 54.8      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Cruceros/Pasajeros    | 128       | 39,600  | 11,009  | 4            | 2.0       | 14.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Carga Rodada (RoRo)   | 240       | 11,000  | 2,849   | 14           | 1.5       | 78.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Frigorífico           | 128       | 9,600   | 3,898   | 10           | 2.0       | 48.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Pesquero <sup>a</sup> | 150       | 1,920   | 1,231   | 8            | 2.5       | 24.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Tanque líquido Esp.   | 197       | 9,400   | 1,983   | 4            | 2.0       | 46.8      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Científico            | 44        | 3,000   | 834     | 14           | 2.5       | 48.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Wellboat              | 129       | 1,920   | 534     | 10           | 2.0       | 12.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |
| Otros <sup>b</sup>    | 161       | 3,000   | 900     | 10           | 2.0       | 41.0      | 0.01         | 0.50         | 0.20      | 0.50      | 0.01      | 0.40      |

<sup>a</sup> Incluye pesquero, pesquero de Arrastre, pesquero Espinero y pesquero Factoria.

<sup>b</sup> Incluye Wellboat, Yates, Transbordadores, Remolcadores, Supply Vessels, entre otros.

El segundo componente fundamental y necesario de la ecuación corresponde necesariamente a los factores de emisión. Tal como se introdujo en la sección metodológica previa, las tasas de generación de contaminantes varían significativamente según el régimen de trabajo del motor. La Tabla 3.2 detalla estos coeficientes específicos expresados en gramos por kilowatt-hora (g/kWh). Las variaciones numéricas entre las fases de maniobra y estadía reflejan las alteraciones termodinámicas en la combustión interna, siendo la métrica del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) la de mayor magnitud absoluta debido a su estequiometría directa con el consumo de hidrocarburos.

Al ejecutar el modelamiento matemático con estos parámetros, se obtienen los inventarios desagregados que permiten focalizar los esfuerzos de mitigación que se detallaran más adelante. La Tabla 3.3 expone los resultados integrados por tipología naval. Los buques portacontenedores, debido a sus requerimientos masivos de potencia y altas frecuencias de recalada, lideran indiscutidamente el volumen de descargas atmosféricas. Tan solo esta categoría es responsable de más de 227 mil toneladas anuales de  $CO_2$  y cerca de 5 mil toneladas de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), seguidos en orden de magnitud por la flota granelera y los buques tanque petroleros.

La dimensión geográfica del impacto ambiental se estructura en la Tabla 3.4, la cual correlaciona el nivel de actividad de cada bahía con la huella de carbono y sustancias

Tabla 3.2: Factores de emisión de referencia según tipo de motor y fase (g/kWh).

| <b>Contaminante</b>     | <b>EF_ME_man</b> | <b>EF_ME_est</b> | <b>EF_AE</b> |
|-------------------------|------------------|------------------|--------------|
| <b>NO<sub>x</sub></b>   | 13.900           | 13.900           | 12.700       |
| <b>CO</b>               | 2.128            | 1.400            | 1.100        |
| <b>NMVOC</b>            | 1.770            | 0.590            | 0.390        |
| <b>PM<sub>10</sub></b>  | 1.108            | 0.729            | 0.300        |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b> | 1.020            | 0.671            | 0.276        |
| <b>SO<sub>2</sub></b>   | 2.903            | 1.910            | 1.910        |
| <b>CO<sub>2</sub></b>   | 593.110          | 593.110          | 607.230      |
| <b>BC</b>               | 0.023            | 0.023            | 0.010        |
| <b>NH<sub>3</sub></b>   | 0.022            | 0.022            | 0.022        |

Tabla 3.3: Emisiones portuarias totales por categoría de embarcación (toneladas) año 2023.

| <b>Categoría</b>      | <b>NO<sub>x</sub></b> | <b>CO</b>      | <b>NMVOC</b> | <b>PM<sub>10</sub></b> | <b>PM<sub>2.5</sub></b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>BC</b>  | <b>NH<sub>3</sub></b> |
|-----------------------|-----------------------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| Contenedores (PTC)    | 4,877.2               | 478.1          | 181.3        | 146.3                  | 134.5                   | 657.5                 | 227,040.7             | 4.3        | 8.2                   |
| Graneleros            | 2,475.5               | 237.6          | 85.4         | 70.3                   | 64.7                    | 330.0                 | 115,595.8             | 2.1        | 4.2                   |
| Petroleros            | 1,685.2               | 163.1          | 60.1         | 48.6                   | 44.7                    | 226.1                 | 78,672.3              | 1.4        | 2.8                   |
| Carga General         | 417.3                 | 41.4           | 16.1         | 13.0                   | 12.0                    | 56.5                  | 19,357.7              | 0.4        | 0.7                   |
| Quimiqueros           | 612.5                 | 59.8           | 22.4         | 18.3                   | 16.8                    | 82.3                  | 28,504.5              | 0.5        | 1.0                   |
| Gaseros               | 94.0                  | 9.2            | 3.5          | 2.8                    | 2.6                     | 12.7                  | 4,373.7               | 0.1        | 0.2                   |
| Cruceros/Pasajeros    | 226.5                 | 23.2           | 9.8          | 7.5                    | 6.9                     | 31.4                  | 10,491.7              | 0.2        | 0.4                   |
| Carga Rodada (RoRo)   | 445.5                 | 42.2           | 14.7         | 12.2                   | 11.2                    | 59.0                  | 20,842.3              | 0.4        | 0.8                   |
| Frigorífico           | 205.2                 | 19.5           | 6.9          | 5.6                    | 5.1                     | 27.4                  | 9,622.7               | 0.2        | 0.3                   |
| Pesquero              | 44.3                  | 4.2            | 1.5          | 1.2                    | 1.1                     | 6.0                   | 2,080.2               | 0.0        | 0.1                   |
| Tanque liquido Esp    | 152.5                 | 15.0           | 5.7          | 4.7                    | 4.3                     | 20.6                  | 7,089.4               | 0.1        | 0.3                   |
| Científico            | 17.3                  | 1.7            | 0.6          | 0.5                    | 0.5                     | 2.3                   | 806.1                 | 0.0        | 0.0                   |
| Wellboat              | 13.5                  | 1.4            | 0.6          | 0.4                    | 0.4                     | 1.8                   | 625.5                 | 0.0        | 0.0                   |
| Otros                 | 43.6                  | 5.3            | 1.9          | 1.6                    | 1.4                     | 7.4                   | 2,032.1               | 0.0        | 0.1                   |
| <b>TOTAL NACIONAL</b> | <b>11,310.0</b>       | <b>1,101.8</b> | <b>410.6</b> | <b>333.0</b>           | <b>306.3</b>            | <b>1,520.9</b>        | <b>527,134.8</b>      | <b>9.9</b> | <b>19.0</b>           |

criterio asociadas. El terminal de San Antonio emerge como el polo más crítico a nivel nacional, aglomerando el 13.8 % de la emisión de gases de efecto invernadero del sector, lo que guarda relación directa con su volumen de 1,047 recaladas anuales. Mejillones y Quintero le siguen en jerarquía, configurando un eje norte-centro donde se tensiona severamente la calidad del aire local debido a las intensas maniobras logísticas e industriales.

Tabla 3.4: Desglose de recaladas y emisiones portuarias por terminal geográfico.

| Puerto        | Recaladas    | NOx (ton)       | CO (ton)       | HCNM (ton)   | PM10 (ton)   | PM2.5 (ton)  | SO <sub>2</sub> (ton) | CO <sub>2</sub> (ton) | BC (ton)   | % CO <sub>2</sub> Total |
|---------------|--------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------------------|
| Arica         | 390          | 578.6           | 56.4           | 21.0         | 17.0         | 15.7         | 77.8                  | 26,965.2              | 0.5        | 5.1 %                   |
| Iquique       | 454          | 673.5           | 65.6           | 24.4         | 19.8         | 18.2         | 90.6                  | 31,390.2              | 0.6        | 6.0 %                   |
| Patache       | 287          | 425.8           | 41.5           | 15.5         | 12.5         | 11.5         | 57.3                  | 19,843.6              | 0.4        | 3.8 %                   |
| Tocopilla     | 56           | 83.1            | 8.1            | 3.0          | 2.4          | 2.2          | 11.2                  | 3,871.9               | 0.1        | 0.7 %                   |
| Mejillones    | 978          | 1,450.8         | 141.3          | 52.7         | 42.7         | 39.3         | 195.1                 | 67,620.4              | 1.3        | 12.9 %                  |
| Antofagasta   | 370          | 548.9           | 53.5           | 19.9         | 16.2         | 14.9         | 73.8                  | 25,582.4              | 0.5        | 4.9 %                   |
| Chañaral      | 77           | 114.2           | 11.1           | 4.1          | 3.4          | 3.1          | 15.4                  | 5,323.9               | 0.1        | 1.0 %                   |
| Caldera       | 212          | 314.5           | 30.6           | 11.4         | 9.3          | 8.5          | 42.3                  | 14,658.0              | 0.3        | 2.8 %                   |
| Huasco        | 87           | 129.1           | 12.6           | 4.7          | 3.8          | 3.5          | 17.4                  | 6,015.3               | 0.1        | 1.1 %                   |
| Coquimbo      | 215          | 318.9           | 31.1           | 11.6         | 9.4          | 8.6          | 42.9                  | 14,865.4              | 0.3        | 2.8 %                   |
| Los Vilos     | 40           | 59.3            | 5.8            | 2.2          | 1.7          | 1.6          | 8.0                   | 2,765.7               | 0.1        | 0.5 %                   |
| Quintero      | 820          | 1,216.5         | 118.5          | 44.2         | 35.8         | 32.9         | 163.6                 | 56,696.0              | 1.1        | 10.8 %                  |
| Valparaíso    | 586          | 869.3           | 84.7           | 31.6         | 25.6         | 23.5         | 116.9                 | 40,516.9              | 0.8        | 7.7 %                   |
| San Antonio   | 1,047        | 1,553.2         | 151.3          | 56.4         | 45.7         | 42.1         | 208.9                 | 72,391.1              | 1.4        | 13.8 %                  |
| Talcahuano    | 118          | 175.1           | 17.1           | 6.4          | 5.2          | 4.7          | 23.5                  | 8,158.7               | 0.2        | 1.6 %                   |
| Lirquén       | 259          | 384.2           | 37.4           | 13.9         | 11.3         | 10.4         | 51.7                  | 17,907.6              | 0.3        | 3.4 %                   |
| San Vicente   | 590          | 875.3           | 85.3           | 31.8         | 25.8         | 23.7         | 117.7                 | 40,793.5              | 0.8        | 7.8 %                   |
| Coronel       | 309          | 458.4           | 44.7           | 16.6         | 13.5         | 12.4         | 61.6                  | 21,364.7              | 0.4        | 4.1 %                   |
| Corral        | 14           | 20.8            | 2.0            | 0.8          | 0.6          | 0.6          | 2.8                   | 968.0                 | 0.0        | 0.2 %                   |
| Pto. Montt    | 158          | 234.4           | 22.8           | 8.5          | 6.9          | 6.3          | 31.5                  | 10,924.4              | 0.2        | 2.1 %                   |
| Calbuco       | 76           | 112.7           | 11.0           | 4.1          | 3.3          | 3.1          | 15.2                  | 5,254.8               | 0.1        | 1.0 %                   |
| Chacabuco     | 67           | 99.4            | 9.7            | 3.6          | 2.9          | 2.7          | 13.4                  | 4,632.5               | 0.1        | 0.9 %                   |
| Pta. Arenas   | 349          | 517.7           | 50.4           | 18.8         | 15.2         | 14.0         | 69.6                  | 24,130.4              | 0.5        | 4.6 %                   |
| Pto. Natales  | 15           | 22.3            | 2.2            | 0.8          | 0.7          | 0.6          | 3.0                   | 1,037.1               | 0.0        | 0.2 %                   |
| Pto. Williams | 36           | 53.4            | 5.2            | 1.9          | 1.6          | 1.4          | 7.2                   | 2,489.1               | 0.0        | 0.5 %                   |
| <b>TOTAL</b>  | <b>7,624</b> | <b>11,289.3</b> | <b>1,099.7</b> | <b>409.8</b> | <b>332.4</b> | <b>305.7</b> | <b>1,518.1</b>        | <b>526,166.8</b>      | <b>9.9</b> | <b>100.0 %</b>          |

Profundizando en la cinemática de las naves dentro del recinto portuario, es fundamental distinguir el origen temporal de estos compuestos. La Tabla 3.5 segmenta las emisiones netas en función de la fase operativa (valores normalizados a miles de toneladas, kton, para fines analíticos ya que es la unidad más usada en la literatura nacional e internacional). Los datos corroboran que la etapa de estadía o atracadero (*hotelling*) es responsable de cerca del 87 % del volumen global de contaminantes. Esto responde a los tiempos prolongados de carga y descarga que exigen el funcionamiento ininterrumpido de los generadores auxiliares de las naves.

A modo de síntesis de las dinámicas portuarias descritas anteriormente, la Tabla 3.6

Tabla 3.5: Distribución temporal de emisiones por fase operativa en recintos portuarios (expresado en kton/año).

| Contaminante          | Maniobra | Estadía | Total | % Maniobra | % Estadía |
|-----------------------|----------|---------|-------|------------|-----------|
| <b>NOx</b>            | 1.45     | 9.56    | 11.0  | 13.2 %     | 86.8 %    |
| <b>CO</b>             | 0.01     | 0.09    | 0.1   | 12.3 %     | 87.7 %    |
| <b>NMVOC</b>          | 0.01     | 0.03    | 0.0   | 20.7 %     | 79.3 %    |
| <b>PM10</b>           | 28.20    | 84.80   | 113.0 | 25.0 %     | 75.0 %    |
| <b>PM2.5</b>          | 24.60    | 77.60   | 102.2 | 24.1 %     | 75.9 %    |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | 0.02     | 0.15    | 0.2   | 10.9 %     | 89.1 %    |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 64.56    | 452.23  | 517.0 | 12.5 %     | 87.5 %    |

consolida el inventario nacional absoluto, delimitado exclusivamente a las operaciones de atraque y maniobra de aproximación (descartando temporalmente la fase de crucero oceánico que se detallará más adelante). Las cifras dictaminan que la carga ambiental impuesta por la infraestructura marítimo-portuaria en Chile bordea el medio millón de toneladas anuales de dióxido de carbono, cimentando una base de datos robusta para la posterior modelación cartográfica espacial.

Tabla 3.6: Resumen nacional total de emisiones portuarias (Chile, 2023).

| Contaminante              | Emisiones (ton/año) | Unidad  |
|---------------------------|---------------------|---------|
| <b>CO<sub>2</sub></b>     | 527,135             | ton/año |
| <b>NOx</b>                | 11,310              | ton/año |
| <b>CO</b>                 | 1,101.8             | ton/año |
| <b>SO<sub>2</sub></b>     | 1,520.9             | ton/año |
| <b>NMVOC</b>              | 410.6               | ton/año |
| <b>PM10</b>               | 333.0               | ton/año |
| <b>PM2.5</b>              | 306.3               | ton/año |
| <b>BC (Carbono Negro)</b> | 9.9                 | ton/año |

*Nota: Solo emisiones portuarias (maniobra + estadía). Excluye navegación en crucero.*

Una vez resueltos los inventarios correspondientes a las dinámicas estacionarias y de

maniobra en los recintos portuarios, el modelamiento debe expandirse necesariamente hacia alta mar. La fase de cruce constituye el eslabón más demandante computacionalmente del inventario, ya que implica trazar y cuantificar las emisiones a lo largo de las rutas de navegación que conectan los terminales nacionales. Teniendo esto en mente y en consideración, se estructuró una base de datos relacional que parametriza cada segmento marítimo. Dada la gran extensión de las planillas de cálculo originales, la Tabla 3.7 presenta solo una pequeña muestra representativa del diseño de la matriz espacial y operacional, mientras que la Tabla 3.8 aísla la evolución histórica de la frecuencia de viajes para estos mismos tramos. Es importante mencionar que se debe separar esta información para facilitar su legibilidad sin comprometer el rigor de los datos de entrada, y que toda esta información fue recolectada de diversas fuentes nacionales, internacionales y de información solicitada vía transparencia.

Tabla 3.7: Extracto de la caracterización espacial y cinemática de rutas marítimas nacionales.

| ID  | Ruta                     | P.Orig | P.Dest | Dist (nm) | Dist (km) | Vel (kn) | T_h (h) | Tipo Buque              |
|-----|--------------------------|--------|--------|-----------|-----------|----------|---------|-------------------------|
| R01 | Talcahuano → San Vicente | TSH    | SVI    | 1.9       | 3.50      | 26.0     | 0.1     | Granelero (GRA)         |
| R02 | San Antonio → Mejillones | SAN    | MEJ    | 632.4     | 1,171.24  | 36.0     | 17.6    | Portacontenedores (PTC) |
| R03 | Quintero → Mejillones    | QNT    | MEJ    | 584.2     | 1,081.96  | 26.0     | 22.5    | Petrolero (PET)         |
| R04 | Quintero → San Vicente   | QNT    | SVI    | 250.2     | 463.36    | 26.0     | 9.6     | Petrolero (PET)         |
| R05 | Calbuco → Talcahuano     | CLB    | TSH    | 304.2     | 563.38    | 26.0     | 11.7    | Petrolero (PET)         |
| R07 | Puerto Montt → Chacabuco | PMT    | CHA    | 239.4     | 443.39    | 26.0     | 9.2     | Pasaje/RoRo (PTR)       |
| R09 | Puerto Montt → Quellón   | PMT    | QLL    | 102.7     | 190.12    | 26.0     | 3.9     | Pasaje/RoRo (PTR)       |

Tabla 3.8: Evolución histórica de frecuencias de recalada (viajes anuales) por ruta seleccionada.

| ID  | Ruta                     | N2020 | N2021 | N2022 | N2023 | N2024 |
|-----|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R01 | Talcahuano → San Vicente | 120   | 138   | 160   | 175   | 185   |
| R02 | San Antonio → Mejillones | 48    | 52    | 58    | 65    | 72    |
| R03 | Quintero → Mejillones    | 62    | 70    | 75    | 80    | 88    |
| R04 | Quintero → San Vicente   | 28    | 30    | 35    | 38    | 42    |
| R07 | Puerto Montt → Chacabuco | 130   | 145   | 155   | 162   | 175   |
| R09 | Puerto Montt → Quellón   | 180   | 195   | 210   | 225   | 240   |

La conjugación de estas variables cinemáticas con la potencia instalada de los

motores detona el cálculo desagregado por ruta. Debido a la dimensionalidad de las matrices de salida, las cuales como se ha mencionado con anterioridad abarcan factores de carga, índices estequiométricos y emisiones para varios compuestos, se ha abstraído el comportamiento específico del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y los contaminantes criterio para el periodo evaluado. La Tabla 3.9 ilustra cómo la carga térmica de los motores principales y auxiliares durante el régimen de crucero dispara los niveles de emisión.

Tabla 3.9: Progresión de emisiones de  $CO_2$  (toneladas) en fase crucero y consolidado de compuestos criterio.

| ID  | Ruta                     | $CO_2$ 2020 | $CO_2$ 2022 | $CO_2$ 2024 | $NO_x$ 2024 | $SO_x$ 2024 | PM 2024 | Viajes 2024 |
|-----|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|-------------|
| R01 | Talcahuano → San Vicente | 34.60       | 46.13       | 53.34       | 1.51        | 0.14        | 0.02    | 185         |
| R02 | San Antonio → Mejillones | 11,612.13   | 14,031.32   | 17,418.19   | 347.30      | 42.74       | 5.34    | 72          |
| R03 | Quintero → Mejillones    | 8,287.60    | 10,025.32   | 11,763.04   | 331.94      | 29.94       | 3.98    | 88          |
| R04 | Quintero → San Vicente   | 1,602.90    | 2,003.63    | 2,404.35    | 67.85       | 6.12        | 0.81    | 42          |
| R07 | Pto. Montt → Chacabuco   | 11,285.25   | 13,455.49   | 15,191.68   | 426.60      | 38.64       | 5.13    | 175         |
| R09 | Pto. Montt → Quellón     | 6,700.05    | 7,816.72    | 8,933.39    | 250.86      | 22.72       | 3.02    | 240         |

A partir de este barrido matricial total, se puede establecer un ordenamiento jerárquico de las vías marítimas con mayor huella de carbono. La Tabla 3.10 presenta el Top 10 de corredores navieros a nivel nacional. El tránsito pesado de portacontenedores entre San Antonio y Mejillones domina claramente el espectro con un 10.1 % de las emisiones totales de  $CO_2$  en ruta. También llama la atención la prevalencia de los canales australes expresado en las conexiones entre Puerto Montt, Chacabuco y Punta Arenas, operadas principalmente por transbordadores (PTR), concentran un tonelaje de emisiones que compite directamente con la logística minera del norte grande.

Para contextualizar estos hallazgos dentro de un marco temporal más amplio, la Tabla 3.11 compendia la evolución global de la contaminación naval (sumando puerto, maniobra y crucero) a lo largo de los últimos años. Este set de datos es crítico para entender los fenómenos regulatorios. Al observar el vector del dióxido de azufre ( $SO_2$ ), se constata un desplome drástico entre 2019 (4,214.8 ton) y 2020 (3,072.3 ton). Como se planteó en el marco teórico, esta discontinuidad no obedece exclusivamente a la ralentización logística derivada de la pandemia, sino que refleja directamente el éxito de la entrada en vigencia del anexo VI de MARPOL (IMO 2020), que forzó el cambio tecnológico hacia combustibles de bajo azufre (VLSFO) como se había mencionado con anterioridad, ya que si bien todos los contaminantes bajan sus emisiones el año 2020 producto de la pandemia, el  $SO_x$  es el que tiene la caída más abrupta producto



Tabla 3.10: Ranking de las 10 rutas marítimas con mayor impacto en emisiones de CO<sub>2</sub>.

| #  | ID  | Descripción               | P.Orig | P.Dest | E_CO <sub>2</sub> 2024 (ton) | % Total |
|----|-----|---------------------------|--------|--------|------------------------------|---------|
| 1  | R02 | San Antonio → Mejillones  | SAN    | MEJ    | 17,418.2                     | 10.1 %  |
| 2  | R07 | Puerto Montt → Chacabuco  | PMT    | CHA    | 15,191.7                     | 8.8 %   |
| 3  | R34 | Chacabuco → Puerto Montt  | CHA    | PMT    | 14,931.3                     | 8.7 %   |
| 4  | R08 | Puerto Montt → P.Natales  | PMT    | PNA    | 14,287.3                     | 8.3 %   |
| 5  | R29 | Arica → San Antonio       | ARI    | SAN    | 13,226.1                     | 7.7 %   |
| 6  | R03 | Quintero → Mejillones     | QNT    | MEJ    | 11,763.0                     | 6.8 %   |
| 7  | R21 | Antofagasta → San Antonio | ANF    | SAN    | 10,325.2                     | 6.0 %   |
| 8  | R09 | Puerto Montt → Quellón    | PMT    | QLL    | 8,933.4                      | 5.2 %   |
| 9  | R06 | Calbuco → Quintero        | CLB    | QNT    | 7,242.0                      | 4.2 %   |
| 10 | R27 | Talcahuano → Quintero     | TSH    | QNT    | 6,146.5                      | 3.6 %   |

de la implementación de esta normativa más exigente en cuanto a la cantidad de asufre permitido en el combustible.

Ahoa bien, para 2023, la tendencia general muestra un claro efecto rebote impulsado por la reactivación económica, llevando el CO<sub>2</sub> a cifras que rozan los 1.4 millones de toneladas.

Toda la arquitectura matemática expuesta se sostiene sobre un sólido marco normativo e investigativo. La Tabla 3.12 lista las referencias primarias utilizadas para la calibración del modelo, vinculando cada fuente con su aplicación directa en este documento. Destaca la integración cruzada y precisa de los manuales de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) con los boletines estadísticos de DIRECTEMAR (incluyendo información obtenida por ley de transparencia), garantizando que el perfil operativo modelado responda fehacientemente a las condiciones de navegación en el litoral chileno.

Tabla 3.11: Serie de tiempo de emisiones globales del sector marítimo nacional por contaminante (2014-2023).

| Año         | NO <sub>x</sub> | CO             | NMVOC          | PM10           | PM2.5          | SO <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub>    | BC          | NH <sub>3</sub> |
|-------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------------|
| 2014        | 29,381.6        | 2,894.3        | 1,149.9        | 1,301.5        | 1,149.7        | 4,774.4         | 1,312,479.3        | 36.9        | 47.9            |
| 2015        | 29,108.4        | 2,869.6        | 1,140.6        | 1,292.0        | 1,141.8        | 4,714.4         | 1,299,746.8        | 36.7        | 47.5            |
| 2016        | 28,256.6        | 2,788.5        | 1,111.2        | 1,262.5        | 1,117.3        | 4,532.2         | 1,259,940.0        | 36.0        | 46.1            |
| 2017        | 28,540.5        | 2,814.1        | 1,121.3        | 1,273.2        | 1,125.9        | 4,600.3         | 1,273,131.2        | 36.2        | 46.5            |
| 2018        | 28,811.0        | 2,841.3        | 1,131.2        | 1,283.1        | 1,134.1        | 4,661.2         | 1,285,771.6        | 36.5        | 47.0            |
| 2019        | 26,859.0        | 2,651.4        | 1,061.2        | 1,211.3        | 1,075.1        | 4,214.8         | 1,194,732.1        | 34.8        | 43.7            |
| <b>2020</b> | <b>26,155.5</b> | <b>2,582.1</b> | <b>1,034.8</b> | <b>1,106.0</b> | <b>1,017.8</b> | <b>3,072.3</b>  | <b>1,162,001.4</b> | <b>34.1</b> | <b>42.5</b>     |
| 2021        | 28,785.3        | 2,838.2        | 1,135.4        | 1,220.1        | 1,122.8        | 3,278.0         | 1,278,100.0        | 37.7        | 46.8            |
| 2022        | 31,886.8        | 3,144.0        | 1,256.2        | 1,340.8        | 1,233.9        | 3,715.5         | 1,417,695.4        | 41.4        | 51.9            |
| <b>2023</b> | <b>31,278.9</b> | <b>3,085.6</b> | <b>1,235.3</b> | <b>1,324.2</b> | <b>1,218.6</b> | <b>3,596.7</b>  | <b>1,389,218.7</b> | <b>40.9</b> | <b>50.8</b>     |

Tabla 3.12: Corpus documental y bases de datos empleadas en la calibración del modelo de emisiones.

| Cód. | Fuente                                         | Uso metodológico en esta investigación                                      |
|------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| F01  | EMEP/EEA Guidebook 2023 – Navigation           | Marco metodológico Tier 3; clasificación por fase operativa                 |
| F03  | UK Ship Emissions Inventory (ENTEC UK)         | Parámetros técnicos iniciales: Potencia de motores, velocidad por categoría |
| F04  | Boletín Estadístico Marítimo (DIRECTEMAR 2025) | Frecuencias y tonelaje de cabotaje por origen-destino                       |
| F07  | IMO MARPOL Annex VI Reg. 14 (IMO 2019)         | Modelación de cambio de combustible HFO → VLSFO (SO <sub>x</sub> )          |
| F08  | Fourth IMO GHG Study (IMO 2020)                | Proyecciones globales de GEI; validación de factores                        |
| F14  | Haversine Formula (Sinnott 1984)               | Cálculo trigonométrico esférico para distancia entre puertos                |

### 3.3.1. Estructuración Vectorial en Contenedores GeoPackage y su Rol como Insumo del Modelo

Es evidente por lo tanto que el salto cualitativo hacia un inventario naviero de alta resolución exigió abandonar las estimaciones agregadas de consumo de combustible a nivel nacional. Para capturar la complejidad logística de los puertos chilenos y obtener los resultados que se han mostrado en este estudio, se optó por implementar un modelo de Nivel 3 (Tier 3). Esta aproximación metodológica, conocida como Bottom-Up, reconstruye el mapa de emisiones embarcación por embarcación, viaje por viaje, requiriendo un volumen de procesamiento de datos francamente masivo.

Alimentar este modelo no es una tarea trivial. Requiere triangular información dispersa en múltiples repositorios, cruzando bases de datos internacionales de la Organización Marítima Internacional (OMI), registros de la autoridad marítima local obtenidos mediante Ley de Transparencia, y telemetría satelital en tiempo real. La Figura 3.52 ilustra precisamente el uso de plataformas AIS (Automatic Identification System) como MarineTraffic, las cuales permitieron extraer el posicionamiento dinámico, el calado, las velocidades operativas y los tiempos de maniobra de la flota mercante que surca nuestras costas.

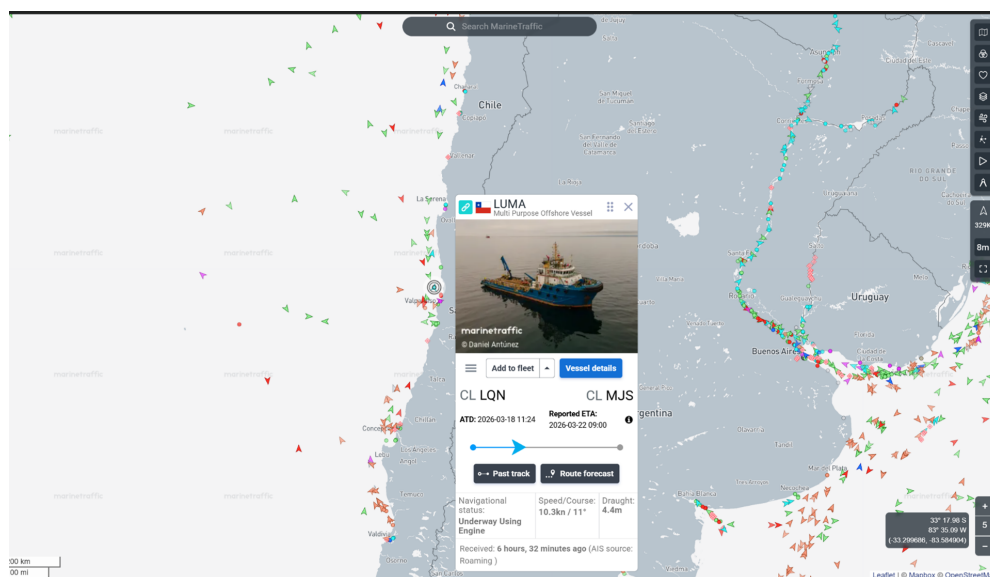


Figura 3.52: Interfaz de rastreo satelital AIS utilizada para levantar parámetros cinemáticos y perfiles operativos de las naves mercantes en ruta.

Toda esta avalancha de datos en crudo debió ser domesticada. Para ello y para pre-

sentar los resultados mostrados en la sección anterior, es que se diseñaron calculadoras paramétricas estructuradas, motores matemáticos que transforman las horas de navegación y la potencia instalada de los motores (principales y auxiliares) en toneladas efectivas de contaminantes.

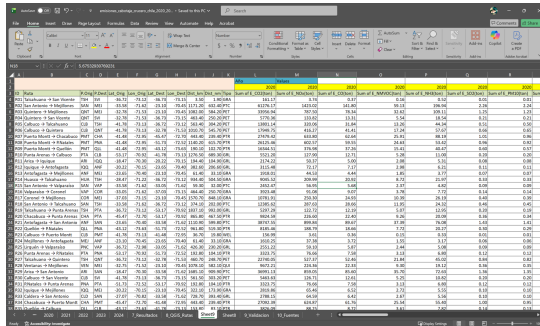


Figura 3.53: Matriz de cálculo relacional estructurando las emisiones ruta por ruta.

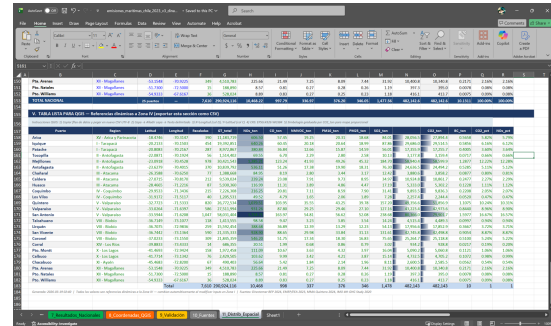


Figura 3.54: Calculadora paramétrica consolidando el tonelaje por puerto previo a su exportación GIS.

Las Figuras 3.53 y 3.54 exponen las entrañas de estas planillas, aunque no logran cuantificar la verdadera dificultad intrínseca para generar estas planillas con un nivel de precisión propio de una investigación de posgrado. En estos archivos paramétricos Cada fila representa un vector logístico evaluado bajo factores de emisión específicos por tipo de embarcación y régimen de carga. Esta estructuración matricial asegura que ninguna recalada quede fuera del radar, permitiendo consolidar el tonelaje exacto que luego será inyectado en el software de planimetría espacial.

Con la base de datos consolidada y validada temporalmente, el siguiente desafío fue anclarla al territorio. La red de puertos nacionales fue modelada en el entorno de QGIS (Figura 3.55), asignando a cada terminal marítimo su cuota correspondiente de responsabilidad ambiental generada por el cálculo Bottom-Up.

Este nivel de resolución queda expuesto con en la Figura 3.56, donde se presentan algunas rutas marítimas modeladas y el tráfico naviero perfila prácticamente el contorno completo de las regiones involucradas, demostrando la capacidad del modelo para interconectar el rigor de una planilla matricial con la fluidez y el impacto visual de la cartografía avanzada.

Ahora bien, para plasmar la distribución geográfica de los flujos de transporte marítimo en el modelo de emisiones, fue indispensable estructurar la red de conectividad costera de todo el litoral nacional. La Figura 3.57 expone la cartografía resultante de la compilación y el trazado de las líneas de navegación que gobiernan las dinámicas de

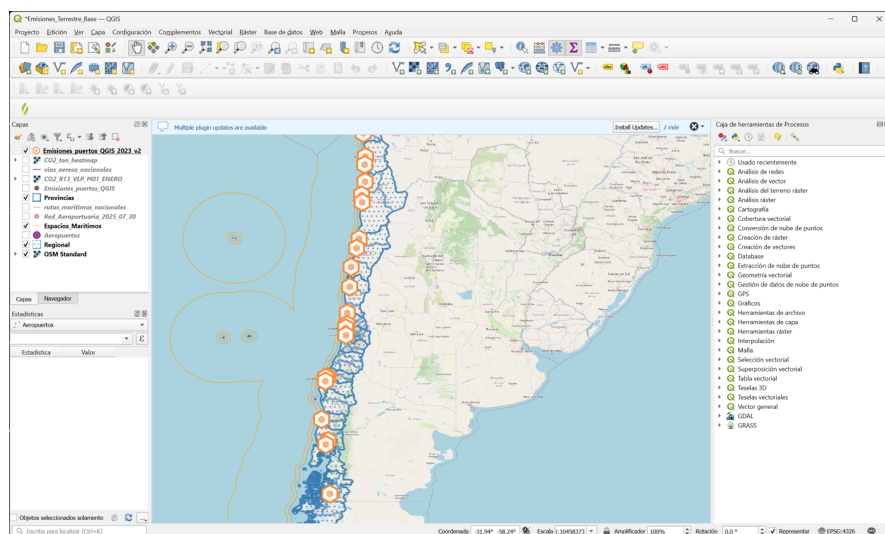


Figura 3.55: Levantamiento espacial de la red portuaria nacional en QGIS, estableciendo los nodos receptores del inventario de emisiones.

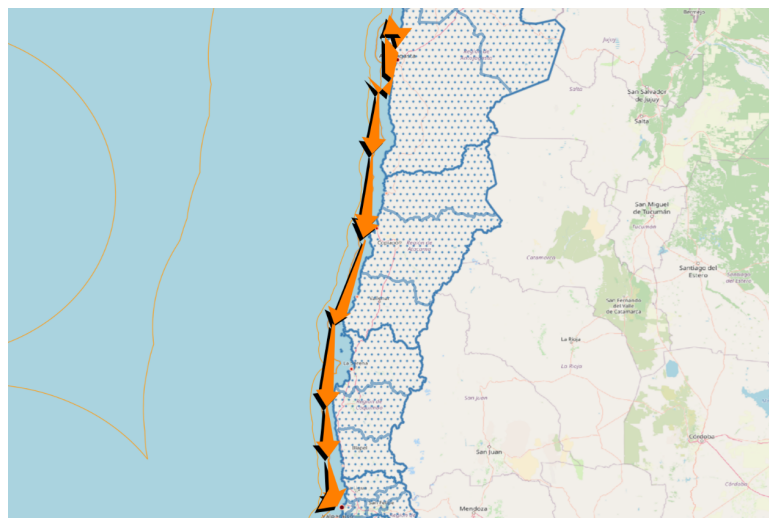


Figura 3.56: Visualización extendida de los corredores logísticos estructurantes de la costa norte de Chile.

cabotaje a lo largo de las macrozonas norte, centro y sur de Chile.

Este entramado de pasillos oceánicos no responde a simplificaciones lineales teóricas o trayectorias geodésicas directas ideales, sino que como se ha dicho anteriormente se ha configurado de manera empírica a través del procesamiento masivo de datos provenientes del Sistema de Identificación Automática (AIS, por sus siglas en *Automatic Identification System*). Como se fundamentó en los capítulos previos, los registros AIS permiten capturar de forma continua parámetros en tiempo real, tales como la velocidad de fondo, el rumbo y el posicionamiento geoespacial de cada buque mercante que opera en aguas jurisdiccionales chilenas. La densificación de estos puntos de geolocalización, representados de manera discreta en los mapas mediante los nodos de control circulares blancos, permitió modelar con absoluta precisión geométrica las rutas náuticas reales ejecutadas por la flota comercial.

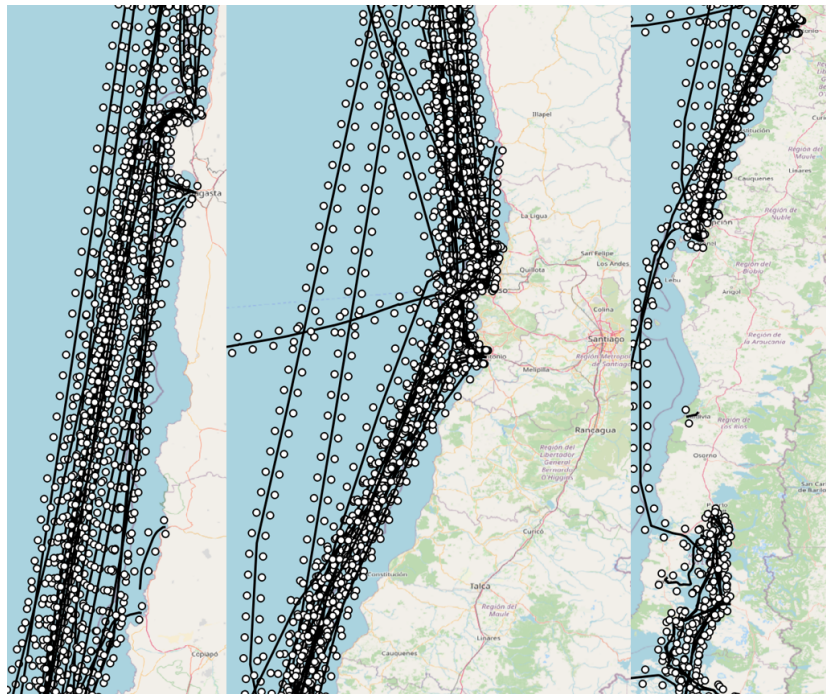


Figura 3.57: Visualización integrada de la red nacional de rutas marítimas de cabotaje estructurada a partir de datos geoespaciales AIS.

El valor de este mapeo radica en su rol como base fundamental y esencial para la etapa posterior de desagregación espacial de los inventarios atmosféricos. Al segmentar las trayectorias costeras complejas en vectores discretos validados por la información de telemetría satelital y terrestre de AIS, el algoritmo de cálculo puede indexar de forma dinámica y en cada tramo del viaje las emisiones calculadas en la fase de cruce.

Tal como se aprecia en el panel central de la Figura 3.57, el modelo logra replicar fenómenos críticos de tráfico, tales como la altísima densidad de aproximación y los cuellos de botella náuticos que se generan frente a los grandes polos portuarios de las regiones de Valparaíso y del Biobío, así como las rutas que conectan las terminales mineras en el extremo regional o el intrincado tránsito por canales en los tramos australes. De este modo, la red estructurada mediante AIS actúa como el esqueleto matemático indispensable sobre el cual se proyectan de forma rasterizada las masas de contaminantes emitidas en alta mar, garantizando que la asignación geográfica de los gases de efecto invernadero y compuestos criterio responda de manera fidedigna a la actividad logística real del sector.

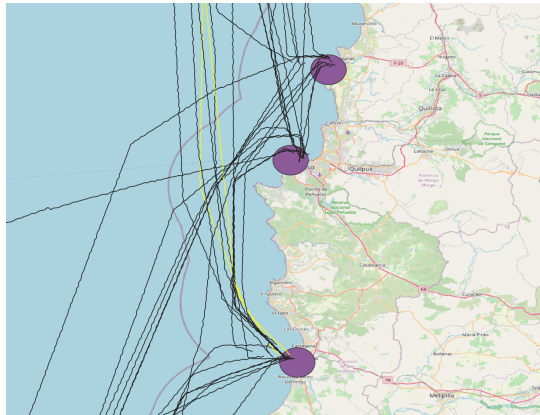
Entonces una vez que ya están consolidados los balances de masa estequiométricos para las fases de puerto, maniobra, fondeo a la gira y crucero, la transición hacia la representación espacial precisa y de alta resolución requiere un modelo de datos robusto. Este debe vincular geometrías vectoriales explícitas con densas matrices alfanuméricas de contaminantes. Para cumplir con esta exigencia metodológica, en primera instancia se programaron algoritmos espaciales en Python que procesan las bases de datos relacionales y centralizan los resultados estructurales en contenedores optimizados bajo el estándar abierto GeoPackage (.gpkg).

Este formato de almacenamiento relacional supera las limitaciones clásicas de tamaño y truncamiento de caracteres propias de los antiguos archivos *shapefile*. Esto permite unificar en una única base de datos SQLite indexada las capas de puntos correspondientes a los terminales marítimos y las polilíneas y rutas precisas de las trayectorias de navegación. Por lo tanto, la expresión geográfica de este procesamiento vectorial se despliega de manera segmentada a lo largo del litoral nacional en las Figuras 3.58 y 3.59. En ellas se constata la topología de la red de cabotaje construida por el modelo.

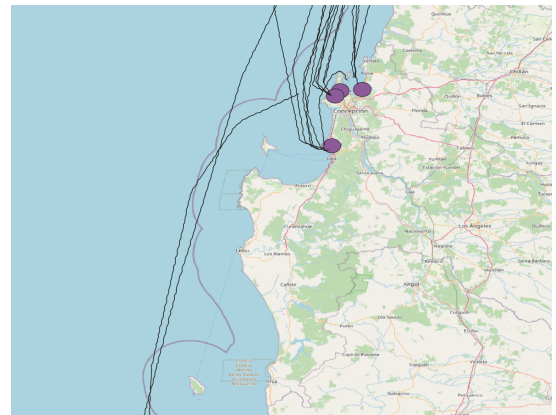
El panel (a) de la Figura 3.58 devela la complejidad del nodo central, donde los vectores de flujo convergen de forma masiva hacia las bahías de Quintero, Valparaíso y San Antonio, dibujando las líneas de aproximación marítima costera y de altura. Por su parte, el panel (b) aísla el comportamiento de la Región del Biobío, georreferenciando con precisión los terminales de Talcahuano, San Vicente, Lirquén y Coronel. Ahora bien, al desplazar el análisis hacia las regiones más australes, en la Figura 3.59 se logra vislumbrar que el comportamiento geométrico de las líneas cambia, ya que se observa que el modelo abandona los corredores rectilíneos de océano abierto y se adapta fielmente a los canales interiores de la Patagonia.

En estas zonas australes, el algoritmo traza perfectamente la conectividad de pasaje



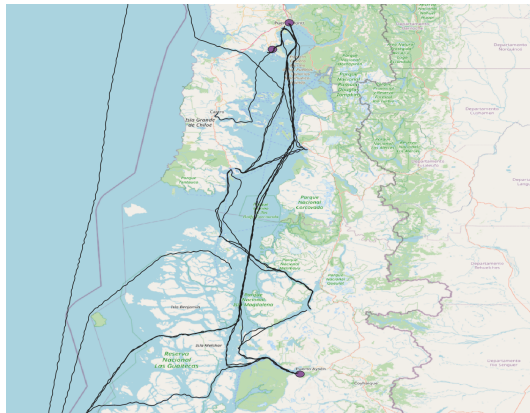


(a) Macro-zona Central



(b) Región del Biobío

Figura 3.58: Visualización de capas vectoriales de rutas y puertos integradas en el GeoPackage para la zona centro y sur-centro.



(a) Canales de Los Lagos y Aysén



(b) Región de Magallanes y Antártica Chilena

Figura 3.59: Modelación geométrica de pasillos interiores de navegación en los sistemas de fiordos del extremo sur de Chile.



desde Puerto Montt y Quellón hacia Chacabuco (panel a) y las intrincadas rutas de abastecimiento que surcan el Estrecho de Magallanes hacia Puerto Natales, Punta Arenas e Isla Navarino (panel b).

La verdadera relevancia metodológica de estos archivos GeoPackage no reside únicamente en su capacidad de despliegue cartográfico, sino también en la estructuración interna de sus bases de datos asociadas. Desde este punto de vista, es que en las Figuras 3.60 y 3.61 se exponen capturas directas que sirven para ejemplificar las tablas de atributos indexadas a las geometrías de líneas y puntos, respectivamente.

| fid | ROUTE_ID | 3g_CO2_CRUCERO   | 3g_NOx_CRUCERO   | 3g_SO2_CRUCERO   | 3g_PM10_CRUCERO  | 3g_PM2.5_CRUCERO | Gg_CO2_CRUCERO   | Gg_NOx_CRUCERO   | Gg_SO2_CRUCERO   | Gg_PM10_CRUCERO  | Gg_PM2.5_CRUCERO |
|-----|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1   | 1        | AGUIRRE-CHAC...  | 5,82411508816... | 0,10950510148... | 0,01822241851... | 0,00968716985... | 0,00842308062... | 0,01143760383... | 0,00452584421... | 0,00019118802... | 0,00022388784... |
| 2   | 2        | AGUIRRE-CISNES   | 8,00143795666... | 0,15171149537... | 0,01157583047... | 0,00777229742... | 0,00777964138... | 0,01913019913... | 0,00786658676... | 0,00018416614... | 0,00018796934... |
| 3   | 3        | AGUIRRE-PTO ...  | 7,17490865020... | 0,11107168947... | 0,01740119179... | 0,00650752329... | 0,00611363416... | 0,01693454842... | 0,00554773496... | 0,00027265494... | 0,00019166078... |
| 4   | 4        | ARICA-ANTOFA...  | 6,67104307046... | 0,12023031100... | 0,01390385351... | 0,00559008085... | 0,00831185321... | 0,01356384093... | 0,00560168325... | 0,00026813045... | 0,00021064383... |
| 5   | 5        | ANTOFAGASTA...   | 14,9950120770... | 0,38287423898... | 0,04167905809... | 0,02172033350... | 0,01917047825... | 0,05023729798... | 0,02245844695... | 0,00072297533... | 0,00062424367... |
| 6   | 6        | ANTOFAGASTA...   | 51,5526222492... | 1,19413877770... | 0,12413272909... | 0,05927126638... | 0,05455437514... | 0,11863039767... | 0,04931963449... | 0,00185482696... | 0,00190089047... |
| 7   | 7        | ANTOFAGASTA...   | 4,99824621079... | 0,17307655060... | 0,01616844490... | 0,00736745838... | 0,00908554839... | 0,01756773934... | 0,00569912208... | 0,00022582940... | 0,00029153830... |
| 8   | 8        | ARICA-CORONEL    | 4,62824758185... | 0,15658336846... | 0,01420683427... | 0,00546080539... | 0,00522327180... | 0,01619143747... | 0,00776391691... | 0,00022323458... | 0,00021224318... |
| 9   | 9        | IQUIQUE-ARICA    | 7,68197402651... | 0,14591002308... | 0,01434606750... | 0,00597670373... | 0,00694201190... | 0,01412789485... | 0,00616938836... | 0,00017939331... | 0,00026125831... |
| 10  | 10       | ARICA-MEJILLO... | 20,0409783604... | 0,30646238075... | 0,04579216910... | 0,01729144801... | 0,02693904586... | 0,05019510565... | 0,01966298845... | 0,00075677163... | 0,00077918311... |
| 11  | 11       | ARICA-SAN AN...  | 66,1218415805... | 1,53161278009... | 0,15921371774... | 0,07602184166... | 0,06997191594... | 0,15215637962... | 0,06325779206... | 0,00237901719... | 0,00243809865... |
| 12  | 12       | CALBUCO-PTO ...  | 7,08451145081... | 0,16236380267... | 0,01708716041... | 0,00806212546... | 0,00700306022... | 0,01262733599... | 0,00582410672... | 0,00026873316... | 0,00019901048... |
| 13  | 13       | CHAWARAL-CAL...  | 4,48654097879... | 0,13341824194... | 0,01936668918... | 0,00909026183... | 0,00723163619... | 0,01271081189... | 0,00488825267... | 0,00024599071... | 0,00020393385... |
| 14  | 14       | CALDERA-QUIL...  | 24,2219298356... | 0,50459693719... | 0,04433689573... | 0,02449254842... | 0,01621448744... | 0,03191449947... | 0,01500398083... | 0,00065087239... | 0,00061391350... |
| 15  | 15       | CASTRO-PTO ...   | 7,55449741718... | 0,12141201918... | 0,01451521624... | 0,00969485500... | 0,00687931956... | 0,01130570746... | 0,00615962868... | 0,00020958841... | 0,00017683521... |
| 16  | 16       | PTA ARENAS-C...  | 5,21116856608... | 0,10453532252... | 0,01165474322... | 0,00735641613... | 0,00825848222... | 0,01310789884... | 0,00725662264... | 0,00025651391... | 0,00028831602... |
| 17  | 17       | CHACABUCO-P...   | 5,09585770379... | 0,17371827301... | 0,01260555660... | 0,00802124454... | 0,00878258524... | 0,01614938992... | 0,00621750194... | 0,00026203745... | 0,00027976003... |
| 18  | 18       | CHACABUCO-S...   | 5,10182668748... | 0,11855913004... | 0,01933888311... | 0,00651300529... | 0,00643588673... | 0,01330241741... | 0,00672446377... | 0,00018183123... | 0,00023269574... |
| 19  | 19       | CHAITEN-PTO ...  | 5,55846422062... | 0,13427597038... | 0,01921031753... | 0,00962871371... | 0,00548759796... | 0,01208094170... | 0,00574591578... | 0,00027732282... | 0,00019949314... |

Figura 3.60: Esquema alfanumérico y campos de emisión integrados en la tabla de atributos de la capa vectorial de rutas marítimas.

Como se aprecia en la matriz de la capa de rutas (Figura 3.60), cada registro está clara y fácilmente identificado por un código de ruta (ROUTE\_ID) que actúa como llave primaria. A este identificador se asocian campos específicos que almacenan la masa neta calculada para cada contaminante durante la fase de cruce (columnas como 3g\_CO2\_CRUCERO, 3g\_NOx\_CRUCERO, 3g\_SO2\_CRUCERO, entre otras). Un diseño análogo se estructuró para la capa de buffers portuarios en la Figura 3.61, donde las filas lógicas parametrizan los nombres de los terminales junto con sus coordenadas geográficas decimales exactas (Latitud, Longitud) y los tonelajes correspondientes a las emisiones agregadas de las subfases de maniobra y estadía.

Esta configuración tabular integrada convierte al GeoPackage en el insumo crítico y el pilar central sobre el cual se ejecuta el procesamiento posterior. Los scripts desarrollados de modelación espacial de alta resolución no leen solo planillas de cálculo

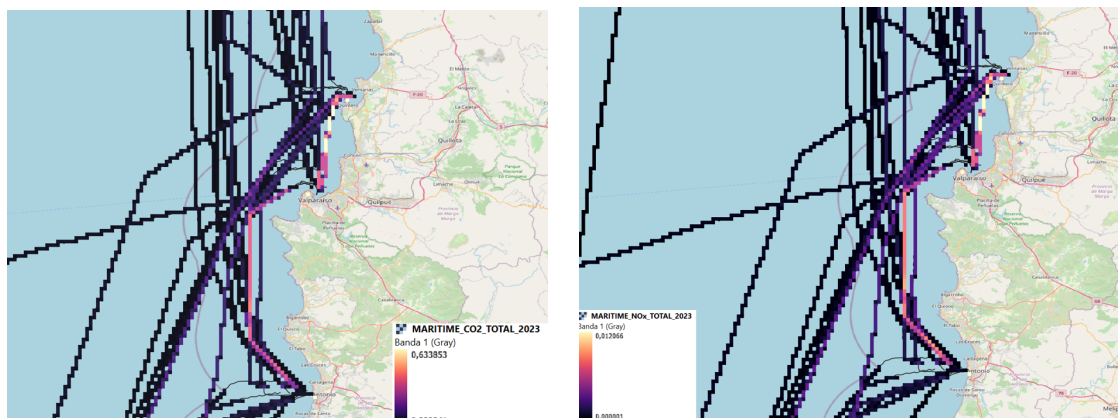
|    | fid | PUERTO      | 32_PUERTO_MANI   | 40_PUERTO_MANI   | 32_PUERTO_MANI   | 10_PUERTO_MANI    | 12_PUERTO_MANI   | 0_PUERTO_MANI    | VOC_PUERTO_MANI  | C_PUERTO_MANI    | K3_PUERTO_MANI   | Latitude | Longitude |
|----|-----|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|-----------|
| 1  | 2   | ARICA       | 24.713278369...  | 0.50370679479... | 0.07794505109... | 0.01766534668...  | 0.01566931168... | 0.05646360141... | 0.02140068185... | 0.00050632827... | 0.00097598094... | -18.4746 | -70.314   |
| 2  | 2   | LIQUEU      | 28.7688483025... | 0.5864292929...  | 0.09073603193... | 0.01766581400...  | 0.0182711667...  | 0.0257942318...  | 0.0249821323...  | 0.00058941804... | 0.0013614192...  | -20.2133 | -70.150   |
| 3  | 3   | PATACHE     | 18.1864745877... | 0.37071627719... | 0.05735956323... | 0.01255834497...  | 0.01155087552... | 0.04155141950... | 0.0154834228...  | 0.00037260568... | 0.00071822187... | -20.8083 | -70.216   |
| 4  | 4   | TECOPILLA   | 3.54858040735... | 0.07234838353... | 0.01119210990... | 0.00245040877...  | 0.00225382936... | 0.00810759404... | 0.00302113995... | 7.27035477179... | 0.0001404085...  | -22.0871 | -70.192   |
| 5  | 5   | MONILLONES  | 69.305443136...  | 1.61156565935... | 0.1954620504...  | 0.0427963897...   | 0.03936152006... | 0.1415933892...  | 0.0527620542...  | 0.00126971552... | 0.00024745991... | -23.0918 | -70.452   |
| 6  | 6   | ANTOFAGASTA | 23.4475976914... | 0.47792600788... | 0.07394786898... | 0.014971920084... | 0.0418973762...  | 0.0356032100...  | 0.01996110329... | 0.00092936672... | 0.00019296064... | -23.6279 | -70.601   |
| 7  | 7   | CHAÑARAL    | 4.84929806011... | 0.09994064661... | 0.01358191111... | 0.00336931206...  | 0.00309901538... | 0.0114794181...  | 0.00415406744... | 9.99673781121... | 0.00019296064... | -26.3588 | -70.42    |
| 8  | 8   | CALDERA     | 13.4339115421... | 0.27383920127... | 0.04237013033... | 0.00927654750...  | 0.00853235404... | 0.0306903461...  | 0.01143717270... | 0.00027523485... | 0.00053053323... | -27.0715 | -70.81    |
| 9  | 9   | HUASCO      | 5.51297313285... | 0.11237740806... | 0.01738747216... | 0.00380688506...  | 0.00350148491... | 0.0125957266...  | 0.0046935672...  | 0.00011295015... | 0.00021771882... | -28.4665 | -71.221   |
| 10 | 10  | QUIMBO      | 13.6240140639... | 0.27717428431... | 0.04296970765... | 0.09047871940...  | 0.00865394990... | 0.0311273700...  | 0.0159901948...  | 0.00027912969... | 0.00034759936... | -29.9533 | -71.343   |
| 11 | 11  | LOS VILOS   | 2.53470209696... | 0.056777382...   | 0.00799436421... | 0.00175029198...  | 0.0016098712...  | 0.00579113860... | 0.00215795711... | 5.19311055128... | 0.000100066...   | -31.9172 | -71.511   |
| 12 | 12  | QUINTERO    | 64.7922198138... | 1.40747795274... | 0.16388446639... | 0.03588098564...  | 0.03300250148... | 0.11871843143... | 0.04423812082... | 0.00106458766... | 0.00224250391... | -32.7723 | -71.533   |
| 13 | 13  | VALPARAISO  | 42.6323009122... | 0.93071778120... | 0.11717143574... | 0.02564177754...  | 0.02358471447... | 0.08484018058... | 0.03161407171... | 0.00070679069... | 0.0014664739...  | -33.0264 | -71.639   |
| 14 | 14  | SAN ANTONIO | 19.7766439650... | 1.78776471653... | 0.20925248331... | 0.04581389265...  | 0.04213855982... | 0.01581035032... | 0.05648542744... | 0.0013592966...  | 0.00262013346... | -33.5944 | -71.620   |
| 15 | 15  | TALCAHUANO  | 7.47736585835... | 0.15241992789... | 0.02358317443... | 0.0051636134...   | 0.00479140435... | 0.0170838588...  | 0.00636597948... | 0.00051319676... | 0.0004929679...  | -36.7149 | -70.707   |
| 16 | 16  | LIRQUEN     | 16.4121843840... | 0.33454885511... | 0.05176350828... | 0.01133314058...  | 0.01042396083... | 0.03749672247... | 0.01397277230... | 0.00033625390... | 0.00064815144... | -36.7075 | -72.983   |
| 17 | 17  | SAN VICENTE | 43.8022612162... | 0.93624395858... | 0.11791687216... | 0.02581680674...  | 0.02374570228... | 0.08541929444... | 0.03182966472... | 0.0007659830...  | 0.0014764639...  | -36.7442 | -73.136   |
| 18 | 18  | CORONEL     | 19.5805971477... | 0.3991335280...  | 0.06175646355... | 0.01352100556...  | 0.01246360848... | 0.0447365103...  | 0.01667021870... | 0.00077316779... | 0.00077327721... | -37.0233 | -73.135   |
| 19 | 19  | CORRAL      | 0.08891451083... | 0.01800372083... | 0.00279027447... | 0.00061260219...  | 0.00056245734... | 0.0020269851...  | 0.0007552498...  | 11.878869294...  | 3.5035212440...  | -39.8833 | -73.43    |

aisladas ni archivos de texto planos, sino que consumen directamente estas bases de datos espaciales.

### 3.3.2. Desagregación Espacial de Emisiones Marítimas

invernadero indexados en el motor de cálculo, para efectos de análisis macroestructural se presentan los campos de concentración espacial correspondientes al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y a los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Se presentan estos dos compuestos ya que actúan como trazadores representativos de la huella de carbono y de la contaminación reactiva local, respectivamente.

El núcleo crítico de esta desagregación espacial para la zona central del territorio se despliega en la Figura 3.62. En este sector se intersectan las rutas de mayor densidad de tráfico de la cuenca del Pacífico con los complejos portuarios e industriales de mayor envergadura del país.



(a) Distribución espacial de  $\text{CO}_2$

(b) Distribución espacial de  $\text{NO}_x$

Figura 3.62: Resultados de la desagregación espacial de alta resolución en la zona central de Chile (periodo 2023).

Al examinar los gradientes cromáticos en ambos paneles de la Figura 3.62, se hace evidente un fenómeno de acumulación local. Mientras que los pasillos de navegación en mar abierto mantienen coloraciones oscuras asociadas a tasas de emisión bajas por unidad de área, debido principalmente a que los buques dispersan su carga a lo largo de extensas trayectorias de cruce, las celdas que confinan la infraestructura portuaria concentran los valores más altos de la escala.

Continuando con el análisis de la distribución espacial de las emisiones marítimas, resulta pertinente examinar los patrones observados en años anteriores para contextualizar la evolución temporal. A continuación, se presentan las figuras 3.63 y 3.64, las cuales ilustran la desagregación espacial de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , respectivamente, para el año base 2019 en la zona costera de la Región de Valparaíso. Estas visualizaciones permiten nuevamente identificar y comparar los principales núcleos de emisión y las rutas

más transitadas, sirviendo de contraste directo con los resultados del 2023 presentados anteriormente.

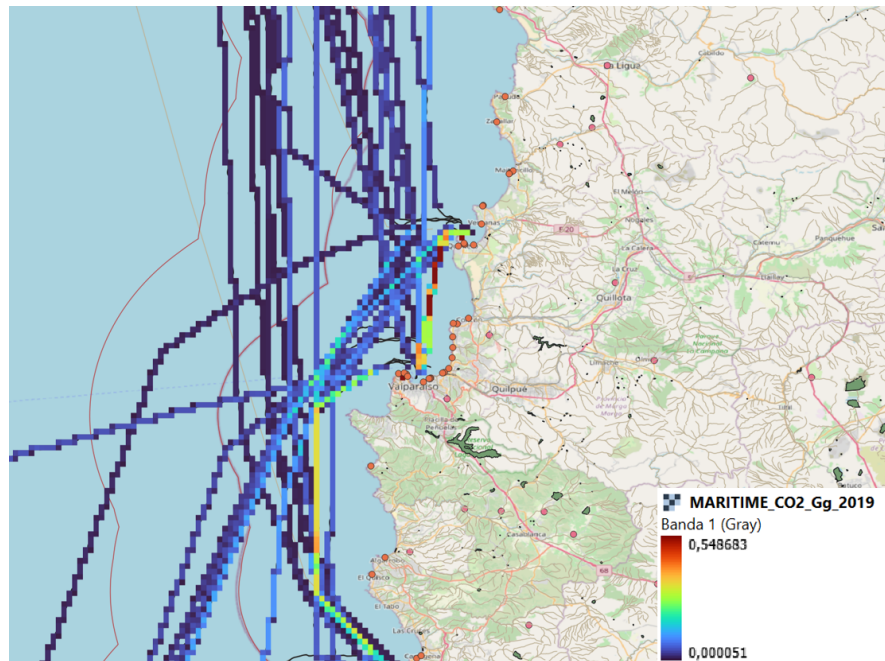


Figura 3.63: Distribución espacial de emisiones marítimas de CO2 (Gg) para el año 2019 en la costa central de Chile. Se observan las altas concentraciones en los terminales portuarios principales.

El análisis conjunto de las Figuras 3.63 y 3.64 revela una homogeneidad espacial significativa en los patrones de emisión de ambos contaminantes, lo que corrobora la fuerte correlación entre las emisiones de CO2 y NOx derivada de los perfiles operativos de las naves en la zona. Es evidente una concentración de emisiones crítica, la cual en estas imágenes se representa mediante hotspots rojos y naranjos circunscritos a las áreas de fondeo y maniobra de los principales terminales portuarios de la región, destacando la Bahía de Valparaíso, la zona de Quintero-Ventanas y, en la parte inferior del mapa, los accesos a San Antonio. En estos nodos portuarios, se registran los valores pico de la escala de intensidad, llegando a aproximadamente 0.55 Gg para el CO2 y superando los 0.01 Gg para NOx por unidad de área analizada en las celdas más saturadas.

Por otro lado, también es importante notar que se distinguen claramente las rutas de navegación preferenciales en alta mar. Una vía principal de tráfico norte-sur es observable a unos 15-20 km de la costa (referenciando la escala en la Figura 3.64), la cual se muestra mayoritariamente en tonos verde y rondando esa gama de colores. Si bien la intensidad de emisión por celda es considerablemente menor en estas rutas que

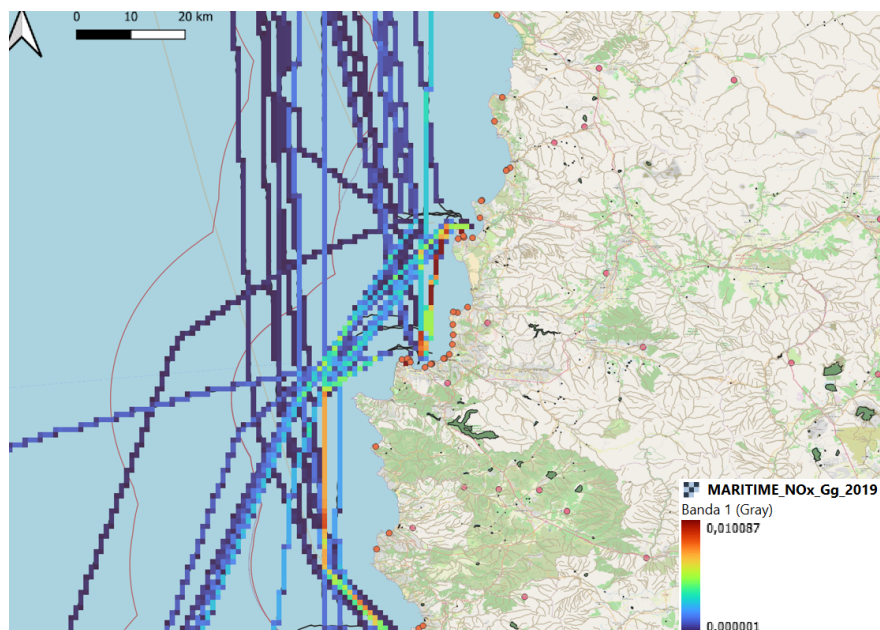


Figura 3.64: Distribución espacial de emisiones marítimas de NOx (Gg) para el año 2019 en la costa central de Chile. Este mapa incluye una escala espacial de referencia.

en las zonas portuarias, el volumen acumulado a lo largo de estas es sustancial y define la huella espacial de las flotas de paso. Al contrastar estas visualizaciones de 2019 con las de 2023 presentadas anteriormente, se observa una persistencia en los núcleos de alta emisión portuaria, aunque con sutiles variaciones en la densidad y ramificación de las rutas de tránsito periféricas. Esto refleja posiblemente cambios en el volumen de carga o en la eficiencia operativa a lo largo de la ventana temporal analizada. Este patrón espacial difuso pero extendido contrapone los hotspots portuarios localizados, delineando la compleja interacción entre operaciones locales y tránsito internacional en la región.

Es evidente que esta saturación focalizada en las bahías de San Antonio, Valparaíso y la zona de Quintero-Ventanas responde al solapamiento operativo de las tres fases del modelo. En esos píxeles específicos se superponen las maniobras de aproximación a baja velocidad (donde los motores principales operan bajo regímenes térmicos ineficientes) con los periodos prolongados de estadía en atracadero, ventana en la cual los generadores auxiliares permanecen encendidos de forma continua para energizar los sistemas internos de las naves y mantener las cadenas de frío de los contenedores.

Ahora y con el objetivo de ampliar el espectro geográfico del análisis y profundizar en la dinámica de las emisiones marítimas, en la Figura 3.65 se presenta la desagregación



espacial de las emisiones de NOx para el año 2019 en una región situada sustancialmente más al sur que la zona central previamente estudiada. Esta área se caracteriza por un sistema complejo de canales y archipiélagos, ofreciendo un contraste ambiental y operativo significativo.

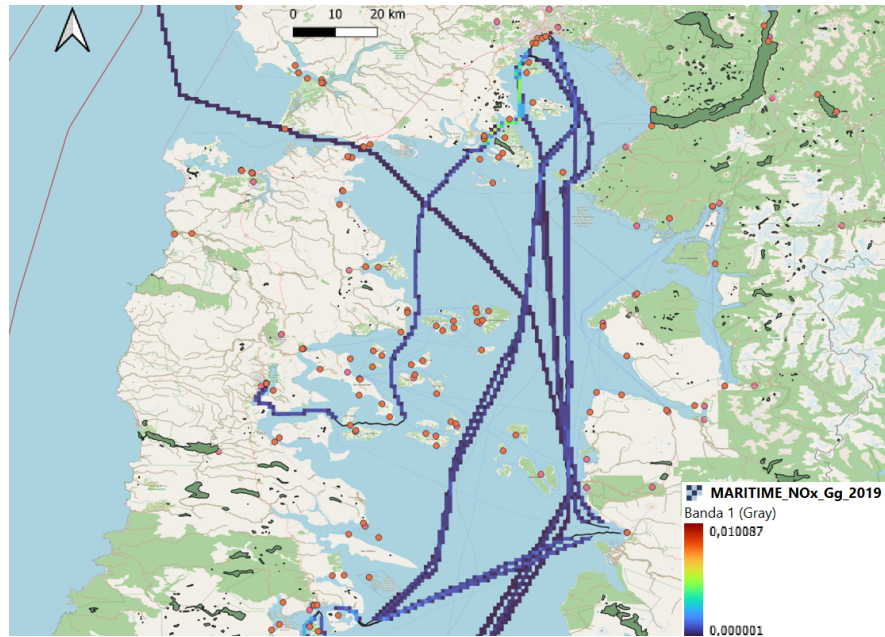


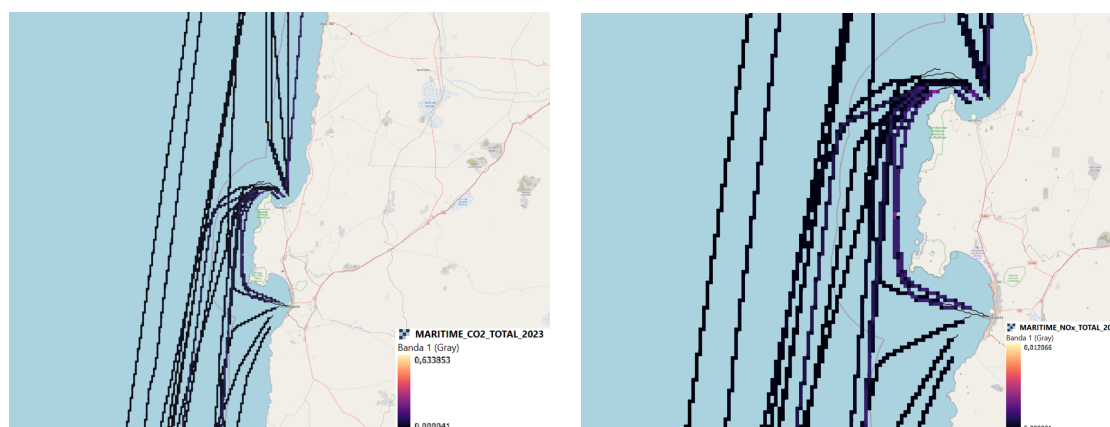
Figura 3.65: Distribución espacial de emisiones marítimas de NOx (Gg) para el año 2019 en una zona costera del sur de Chile, caracterizada por un archipiélago y canales.

Al examinar la Figura 3.65, se observa de inmediato un patrón de emisión fuertemente condicionado por la geografía de los canales y las vías de navegación confinada. La escala de colores empleada es análoga a la utilizada para la zona central (Figura 3.64), facilitando la comparación directa de las intensidades por celda analizada. Se observa claramente que el núcleo de máxima concentración se localiza en un área portuaria significativa en la parte superior-central del mapa, que por la geografía circundante es evidente que corresponde al área de Puerto Montt y sus accesos, reflejando una intensa actividad de fondeo y maniobra en dicho nodo logístico crucial. Se detecta otro foco de emisión considerable en el extremo inferior derecho de la imagen, indicando otra zona de actividad económica marítima relevante en la costa continental.

Las rutas de navegación que se aprecian delinean con precisión los corredores principales que atraviesan el archipiélago y los canales interiores. A diferencia de la zona central, donde las rutas en alta mar son más rectilíneas y se encuentran a mayor distancia de la costa (Figura 3.64), aquí los barcos deben seguir trayectorias un poco

zigzagueantes a través de las vías de agua confinadas, para no pasar evidentemente sobre la tierra. Al contrastar con la zona central, se vislumbra que las intensidades observadas en los canales del sur son menores aunque en algunas celdas si son comparables como se puede observar. Este hallazgo es significativo, ya que sugiere que, a pesar de que la zona sur puede tener un volumen de tráfico total diferente al de la costa central, la intensidad de las emisiones a lo largo de algunas rutas y celdas de los canales es comparable en puntos específicos a la de las rutas de paso en alta mar analizadas con anterioridad. Ahora bien, el patrón espacial en el sur destaca por una mayor dispersión de hotspots secundarios a lo largo de la costa del archipiélago, combinada con núcleos intensos y extensos en los principales nodos portuarios y corredores de navegación confinada, contrastando con el patrón más polarizado de la zona central.

Ahora si nos desplazamos hacia el norte grande, el modelo captura la firma espacial propia de las rutas de suministro minero y transporte de graneles líquidos y sólidos. La Figura 3.66 expone las plumas virtuales de emisión interactuando con la costa de la Región de Antofagasta.



(a) Capa espacial de CO<sub>2</sub> - Norte

(b) Capa espacial de NO<sub>x</sub> - Norte

Figura 3.66: Trazas de emisión celular en el nodo portuario-industrial de Mejillones y Antofagasta.

En este entorno de interés, las celdas de mayor brillo cartográfico aíslan perfectamente las operaciones de la Bahía de Mejillones y los terminales mecanizados de Antofagasta. Las derrotas de aproximación configuran un abanico de vectores que nacen en las rutas troncales oceánicas y convergen de forma perpendicular hacia la costa. El modelo discrimina con nitidez cómo la concentración espacial de contaminantes se constriñe a la línea litoral, dejando las zonas urbanas continentales libres de la carga

directa del sector naval, pero evidenciando una presión ambiental severa sobre el espejo de agua de los recintos portuarios.

Finalmente, las particularidades de la zona sur y los sistemas de fiordos continentales nuevamente quedan integradas en las soluciones cartográficas de la Figura 3.67.

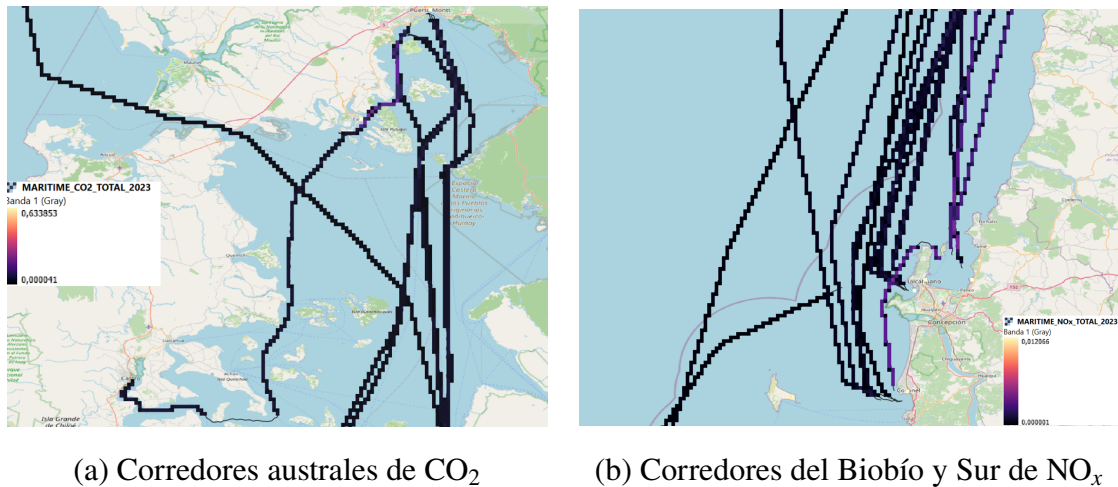


Figura 3.67: Cartografía rasterizada de emisiones marítimas en aguas interiores y nodos de conectividad del sur de Chile.

El panel (a) de la Figura 3.67 devela el comportamiento del modelo en el mar interior de Chiloé y el seno de Reloncaví. Aquí, las celdas activas copian los canales naturales de navegación, reflejando el tránsito de los transbordadores de conectividad regional. Por otro lado, el panel (b) detalla la descarga espacializada en la zona de la Región del Biobío, donde se observa cómo los pasillos de tránsito costero corren paralelos a la península de Hualpén para ingresar a San Vicente y Talcahuano.

Desde una perspectiva metodológica y del foco de esta investigación, la obtención de estos mapas rasterizados concluye de forma exitosa la etapa de desagregación espacial profunda. Estas matrices numéricas distribuidas geográficamente no representan el punto final del estudio, sino que se consolidan como el insumo estático fundamental e indispensable para las rutinas de análisis temporal de alta resolución que se abordarán más adelante. Los scripts de modulación cronológica leerán estas mallas espaciales calibradas y, aplicando los perfiles horarios y estacionales correspondientes, fraccionarán secuencialmente las masas de contaminantes contenidas en cada celda para reconstruir la variación temporal del inventario a lo largo de las 8,760 horas del año cronológico.



### 3.3.3. Caso de Estudio: Análisis Espacial en la Bahía de Quintero

La flexibilidad del marco metodológico y de los modelos desarrollados trasciende los objetivos planteados para esta investigación. Para poner a prueba su escalabilidad y nivel de resolución, se ejecutó una modelación específica sobre uno de los nodos logísticos más complejos y ambientalmente sensibles del país: la Bahía de Quintero. Este polo industrial cobija una densa red de terminales especializados como se presentó con anterioridad, operando transferencias que van desde gas natural licuado hasta graneles químicos y combustibles. Semejante nivel de actividad lo convierte en un escenario inmejorable para visualizar la asignación espacial de inventarios y cuantificar el impacto atmosférico del tráfico marítimo.

El paso inicial en esta auditoría territorial exigió un levantamiento exhaustivo de las coordenadas operativas. La Figura 3.68 muestra el catastro de los puntos de atraque y monoboyas distribuidos. Comprender esta geografía es vital, ya que las emisiones no ocurren en un punto abstracto, sino a lo largo de un corredor dinámico. Por ello, se delimitaron tanto las áreas primarias de fondeo y espera en alta mar (Figura 3.69), como los vectores de aproximación que siguen los buques mercantes hacia cada muelle particular, estableciendo los polígonos de actividad operativa directa (Figura 3.70).



Figura 3.68: Catastro satelital de sitios de atraque y terminales.

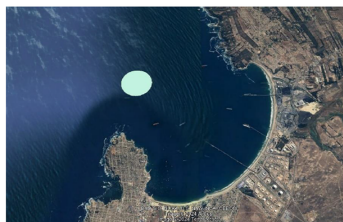


Figura 3.69: Identificación de la zona principal de fondeo.



Figura 3.70: Vectores de aproximación y polígonos de influencia.

Evidentemente, una captura satelital por sí sola carece de capacidad de cálculo. Para inyectar la data de tráfico y los factores de emisión de las naves, la planimetría cruda fue migrada hacia un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La Figura 3.71 expone la digitalización del complejo portuario mediante el uso de QGIS. Mediante este proceso de vectorización, cada ruta de navegación y terminal asume el rol de una entidad espacial paramétrica, capaz de albergar volúmenes de carga, tiempos de maniobra y potencias de motores auxiliares.

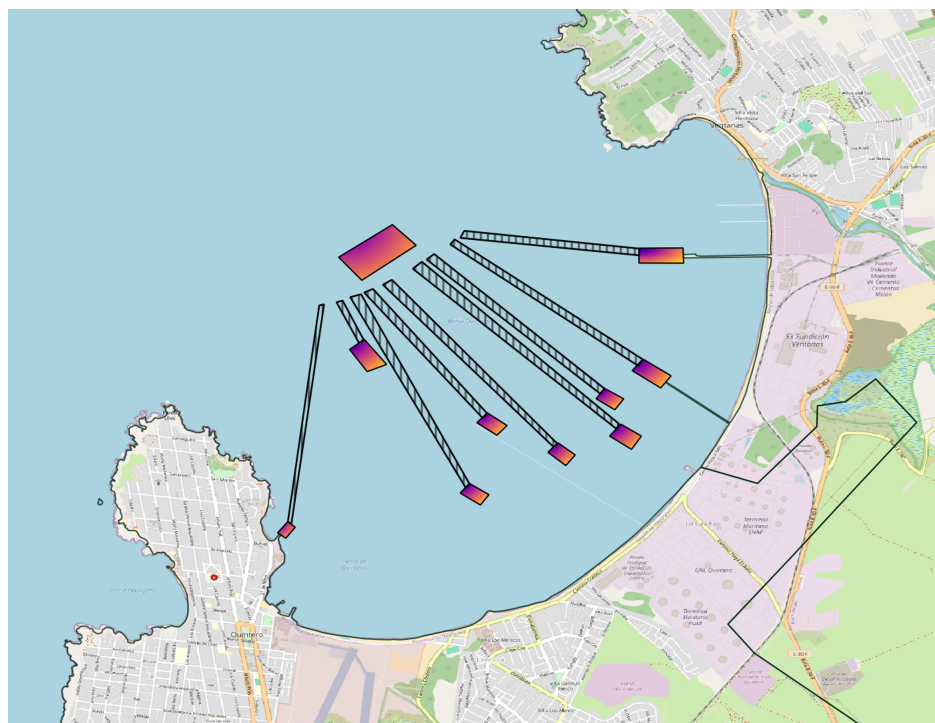


Figura 3.71: Traducción de la infraestructura portuaria a un entorno SIG, estructurando la base geométrica para la asignación del inventario de emisiones.

El rendimiento de esta arquitectura algorítmica se materializa al solicitarle al modelo la proyección de contaminantes específicos. Utilizando técnicas de discretización por grillas sobre el lecho marino, es posible capturar la huella térmica y química de las operaciones portuarias. Las Figuras 3.72 y 3.73 ilustran este nivel de detalle al mapear la densidad de Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ) y Material Particulado Fino ( $PM_{2,5}$ ), respectivamente.

La lectura de estos mapas de calor desmiente la idea de que la contaminación se distribuye de manera uniforme en la bahía. La intensidad cromática de ciertas celdas delata inmediatamente a los terminales que exigen mayores tiempos de estadía o que reciben buques con motores de menor eficiencia, generando puntos calientes o zonas de sacrificio focalizadas. Esto es un descubrimiento vital, ya que desde la perspectiva de la gestión pública, disponer de una topografía de emisiones tan granular cambia las reglas del juego, porque permite a los reguladores abandonar las políticas generalistas y concentrar las exigencias de mitigación, tales como la obligación de usar combustibles bajos en azufre, el control de velocidad en la zona de aproximación, o la implementación de conexión eléctrica a tierra (Cold Ironing), de forma exclusiva en los cuadrantes más

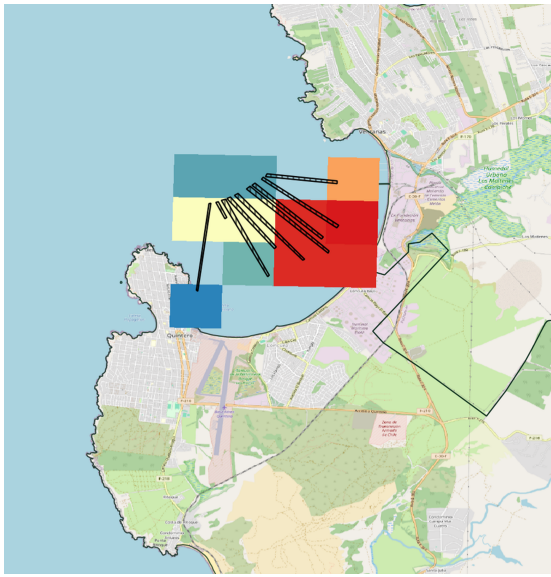


Figura 3.72: Distribución espacial y densidad de emisiones de Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ).

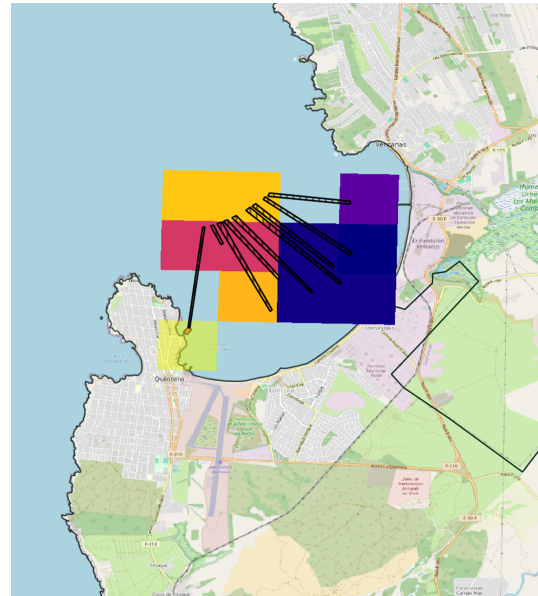


Figura 3.73: Grilla térmica que acusa la concentración operativa de Material Particulado ( $PM_{2,5}$ ).

críticos, optimizando los recursos para proteger la calidad del aire de las comunidades aledañas.

Siguiendo con la radiografía ambiental de este polo portuario, resulta imperativo incorporar a la ecuación el comportamiento espacial del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). El mapeo conjunto de estos gases obedece a razones estratégicas muy distintas, ya que mientras la cuadrícula del  $CO_2$  nos entrega una métrica directa de la eficiencia energética y el impacto climático global de las operaciones navieras, el conteo de  $NO_x$  revela la emisión de un precursor químico crítico como se ha expuesto en las secciones anteriores. Este último es crucial ya que reacciona fotoquímicamente en la atmósfera y agrava de manera directa la calidad del aire que respira la población urbana aledaña a los muelles.

Las Figuras 3.74 y 3.75 exponen la distribución territorial de ambas variables. Al cruzar la información visual de estas grillas, queda en evidencia cómo los vectores de aproximación y las áreas de maniobra imponen una pesada carga sobre el entorno marino. Los píxeles de mayor saturación coinciden milimétricamente con los sitios donde las naves deben mantener sus motores auxiliares encendidos a máxima capacidad para garantizar el suministro eléctrico durante las prolongadas faenas de carga y descarga.

Ahora bien, recordemos que el poder analítico de la metodología desarrollada y

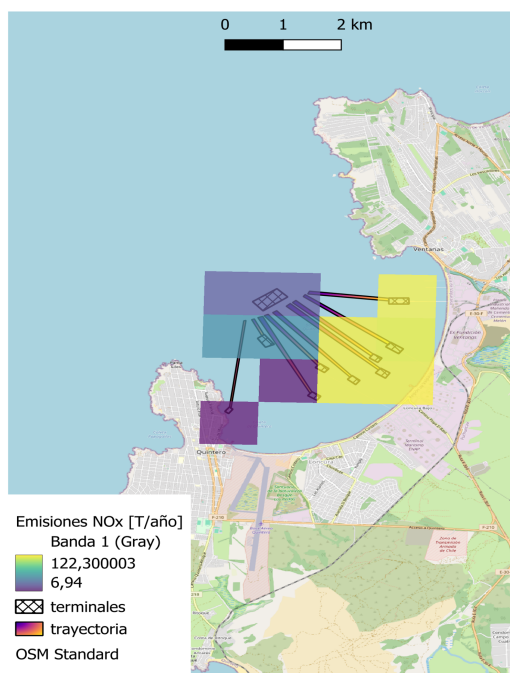


Figura 3.74: Desagregación espacial de Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) [T/año] en la Bahía de Quintero, evidenciando el impacto directo de las trayectorias de aproximación.

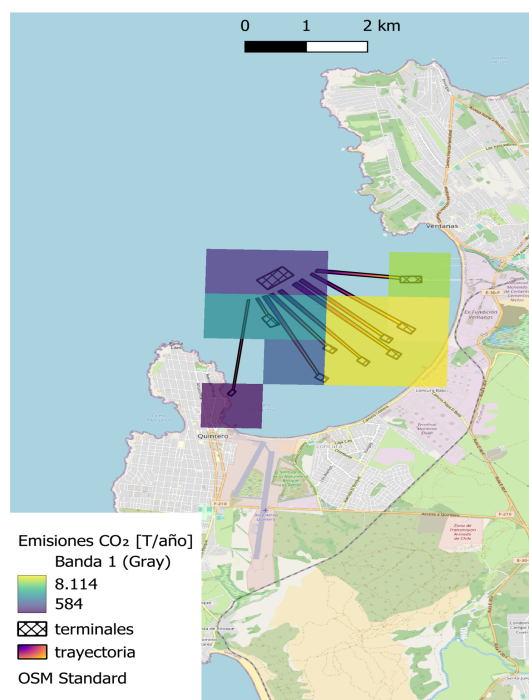


Figura 3.75: Distribución de las emisiones de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) [T/año], marcando las zonas de mayor intensidad operativa e ineficiencia térmica.

de los modelos geoespaciales generados no se restringe a confinamientos geográficos reducidos o bahías semicerradas, sino que se expande a todo Chile. Para demostrar la robustez y escalabilidad del sistema informático, el modelo fue sometido a una prueba de estrés territorial, extendiendo su rango de captura para trazar la actividad mercante a macroescala.

Un excelente laboratorio para medir esta capacidad lo constituye por ejemplo la intrincada geografía de la zona austral presentada anteriormente. Modelar este nivel de tráfico logístico supone un salto cualitativo enorme. Ya no se trata de procesar las maniobras de un puñado de buques en un par de kilómetros cuadrados, sino de rastrear la huella ambiental de convoyes enteros, flotas salmoneras y transporte de pasajeros a lo largo de cientos de millas náuticas. Contar con esta planimetría resulta de un valor incalculable para el diseño de políticas públicas a nivel nacional. Al lograr cuantificar de manera fidedigna las externalidades del transporte en ecosistemas de altísima fragilidad ambiental, se abre la puerta técnica para justificar y diseñar futuras Zonas de Control de Emisiones (ECA) que resguarden el patrimonio natural del extremo sur del país.

### **3.4. Desagregación Espacial con Resolución de 100m x 100m**

Hasta este punto, los resultados presentados han operado en su totalidad sobre una grilla espacial estandarizada, útil para visualizar la dinámica de los flujos de transporte a nivel regional y nacional. Ahora bien, si uno quisiera capturar fenómenos micro-locales muy precisamente, con un nivel de detalle máximo y evaluar la exposición a contaminantes en zonas críticas, se debería mejorar esta resolución espacial para llevarla al máximo posible, es con este fin que se llevó a cabo un reprocesamiento del inventario elevando drásticamente la resolución espacial a celdas de 100 por 100 metros (equivalentes a una hectárea). El incremento de la resolución de 1 kilómetro a 100 metros implica multiplicar por cien la cantidad de celdas a procesar para una misma área geográfica, escalamiento el cual demandó un esfuerzo computacional extraordinario. La generación de estas cartografías requirió someter a la unidad central de procesamiento (CPU) y a la memoria RAM del equipo a cargas de trabajo prolongadas, dado que los algoritmos de asignación debieron cruzar, interpolar y rasterizar miles de matrices de datos de forma simultánea, lo cual ocasionó que el tiempo de procesamiento y el costo temporal de compilación fuera considerablemente mayor, pero los resultados obtenidos



permiten un nivel de escrutinio geoespacial sin precedentes en el contexto de este estudio.

Comenzando por el sector naviero, se tiene que la cuadrícula de 100x100m devela la estructura interna de las rutas que antes se veían como un corredor homogéneo. Las Figuras 3.76 y 3.77 muestran el área de Valparaíso y Quintero para el año 2019. En estas imágenes, se observa que este nivel de resolución espacial al detalle logra aislar las trayectorias individuales de las embarcaciones, es más, el nivel de detalle es tal que en el acercamiento al puerto de San Antonio (Figura 3.78), la saturación roja en el canal de acceso define con exactitud milimétrica el embudo de tráfico comercial, alcanzando valores máximos sobre el umbral de 3.23 Gg por celda en la zona de mayor densidad.

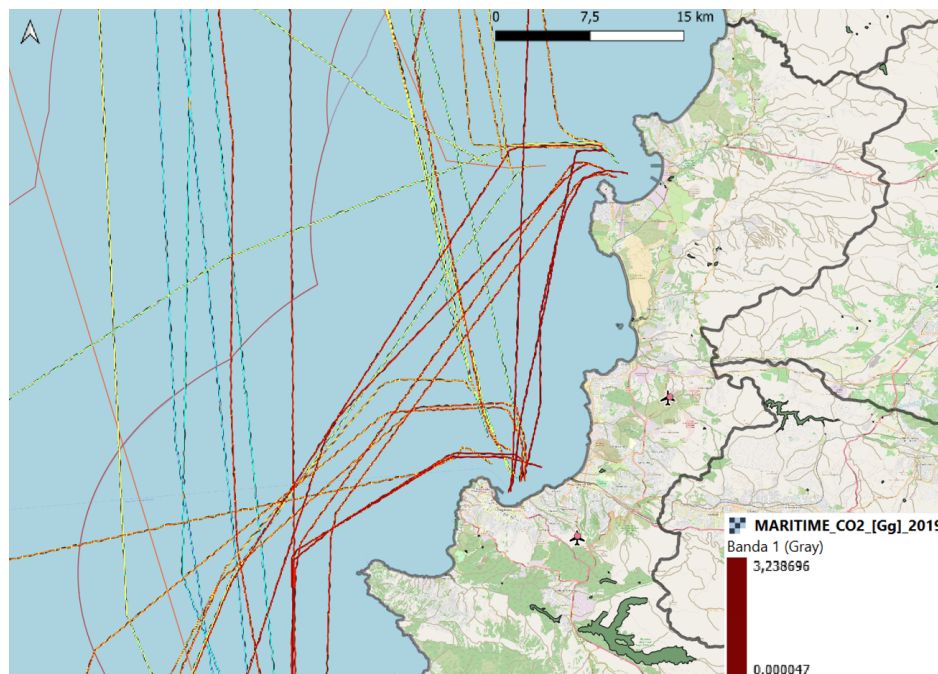


Figura 3.76: Desagregación de emisiones marítimas de CO2 a resolución de 100mx100m en la costa de la Región de Valparaíso (2019).

Este mismo grado de precisión se aplicó para todo Chile incluyendo la zona sur del país (Figuras 3.79 y 3.80), donde la complejidad topográfica de los fiordos y canales que se expuso anteriormente exige maniobras restrictivas. La grilla fina permite mapear con exactitud por qué lado de los islotes transita la carga y dónde se producen los cuellos de botella que concentran las emisiones.

Asimismo, en el ámbito de la desagregación espacial de las emisiones aéreas, los resultados para el año 2023 sobre la capital (Figuras 3.81 y 3.82) validan la eficacia

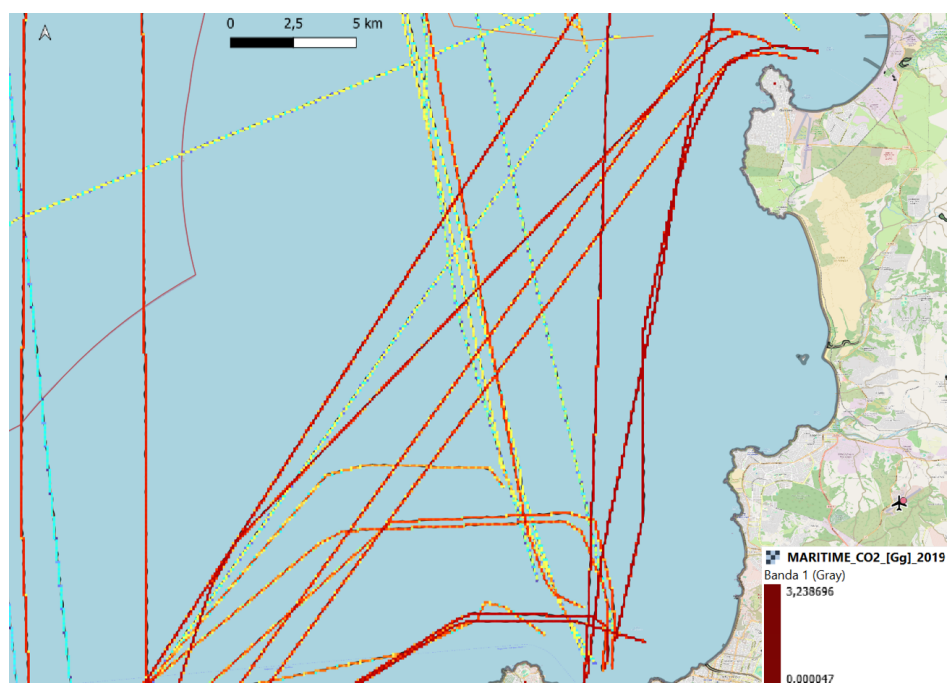


Figura 3.77: Acercamiento a la matriz de 100mx100m en la zona de Quintero, evidenciando las trayectorias individuales de las naves.

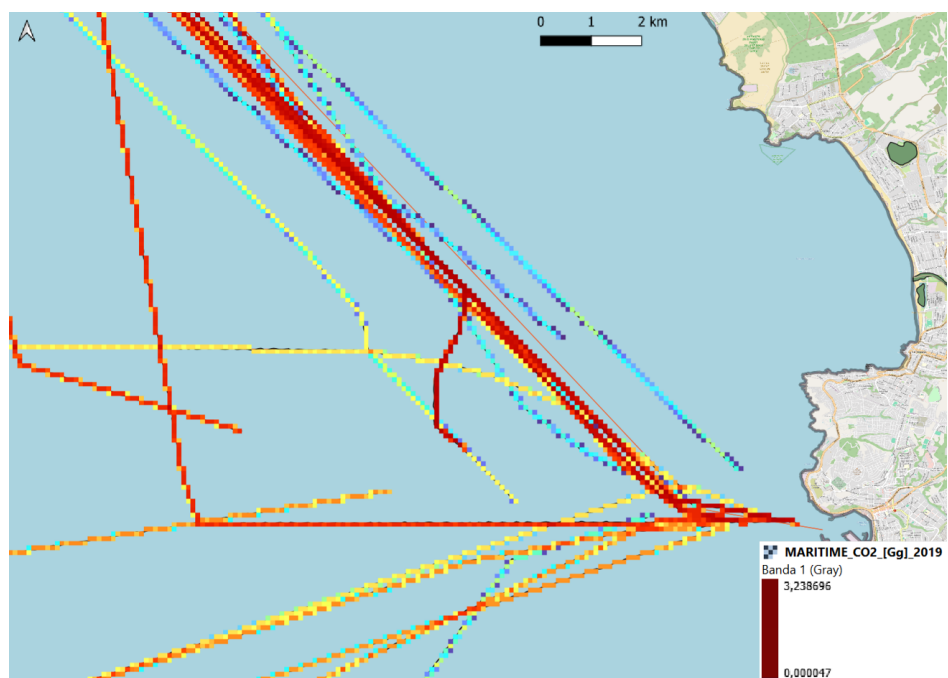


Figura 3.78: Detalle del acceso al puerto de San Antonio bajo la grilla de altísima resolución (100mx100m), mostrando la convergencia de rutas comerciales.

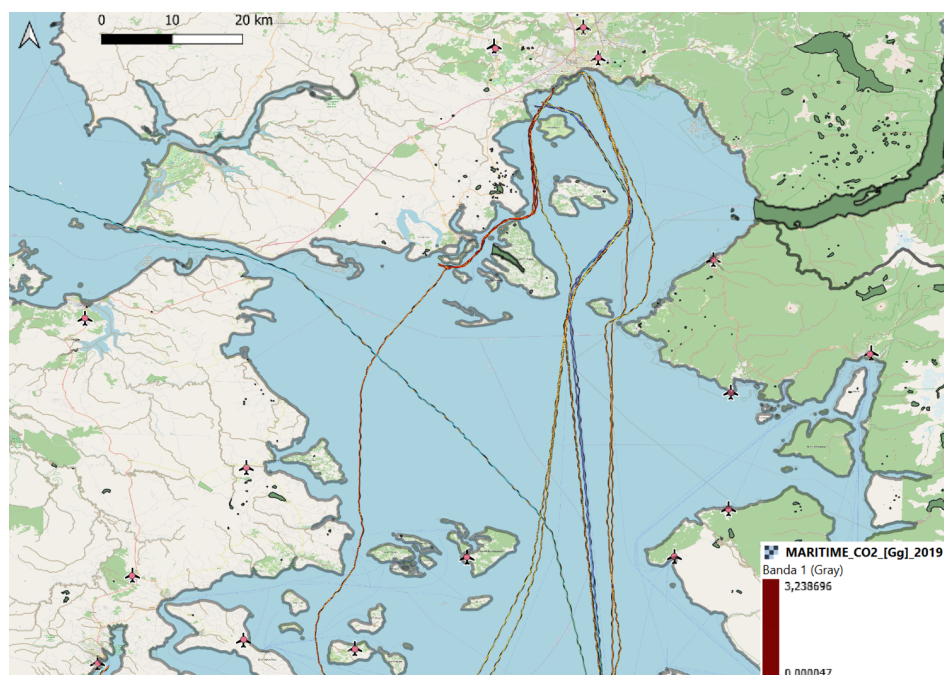


Figura 3.79: Mapa de alta resolución (100mx100m) para las emisiones marítimas de CO2 en el sistema de canales del sur de Chile (2019).

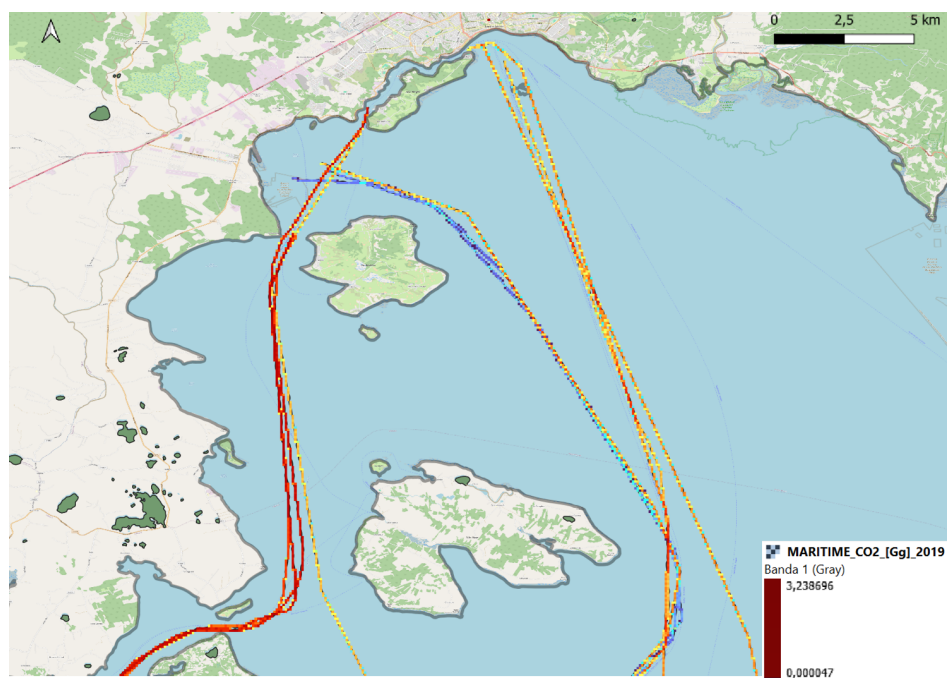


Figura 3.80: Acercamiento a las vías de navegación confinada en la zona sur, modeladas a 100mx100m.



del modelo para representar dinámicas tridimensionales proyectadas en el plano, ya que se puede observar que los patrones de espera (holdings) que realizan las aeronaves comerciales antes de enfilarse hacia la pista del aeropuerto Arturo Merino Benítez quedan dibujados no como áreas de influencia gruesas, sino como órbitas definidas celda por celda. Esta finura geométrica es esencial si en estudios posteriores se deseara por ejemplo cruzar esta huella de contaminación con la distribución demográfica subyacente.

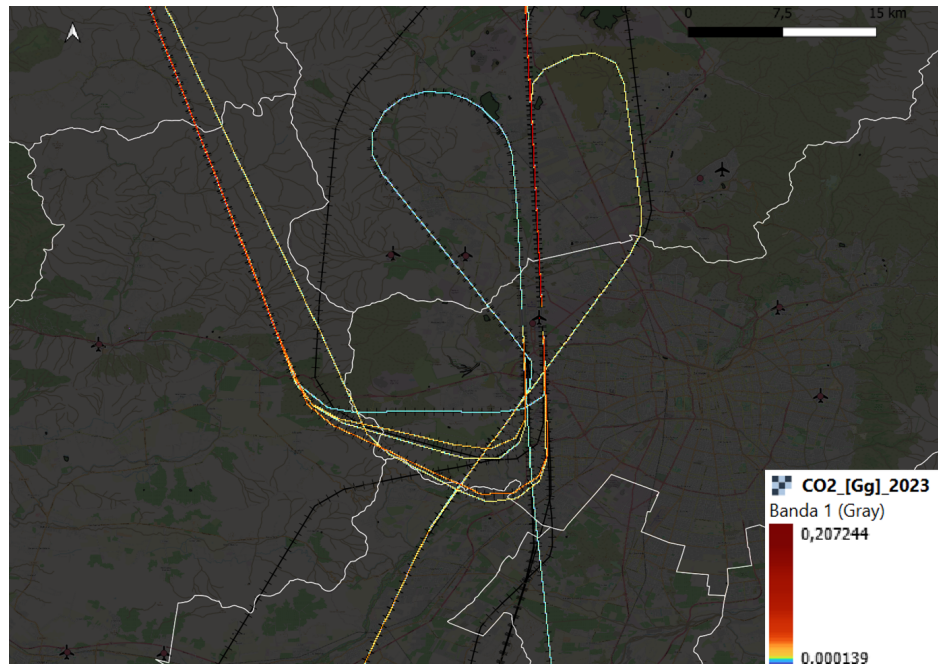


Figura 3.81: Emisiones aéreas de CO2 desagregadas a 100mx100m en el espacio aéreo de Santiago (2023).

Finalmente y con el fin de ilustrar el impacto directo que tiene el tamaño de la celda sobre la percepción visual e interpretación de los datos, se elaboró una cartografía comparativa del sector terrestre para el año 2024, presentada en la Figura 3.83. En este mapa, la Región Metropolitana (RM) fue procesada utilizando la matriz intensiva de altísima resolución de 100x100m, mientras que la Región de Valparaíso adyacente conservó la alta resolución estándar de 1x1 kilómetro.

Un análisis superficial de la leyenda y los colores de la Figura 3.83 podría sugerir, erróneamente, que las rutas de la Región de Valparaíso generan más emisiones que la densa red vial de Santiago. Las celdas en Valparaíso alcanzan un máximo en la escala de 43.87 Gg/año, representadas con tonos más oscuros y saturados, mientras que las de la RM parecen reportar máximos de solo 16.61 Gg/año. Esta discrepancia óptica es

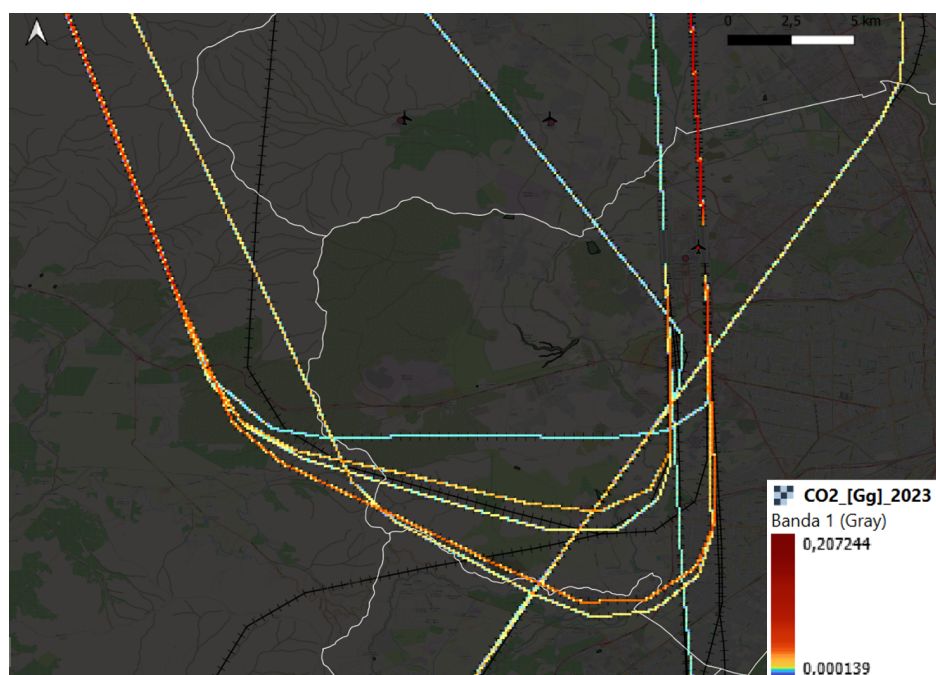


Figura 3.82: Acercamiento a los vectores de aproximación y maniobras aéreas sobre la Región Metropolitana a resolución fina.

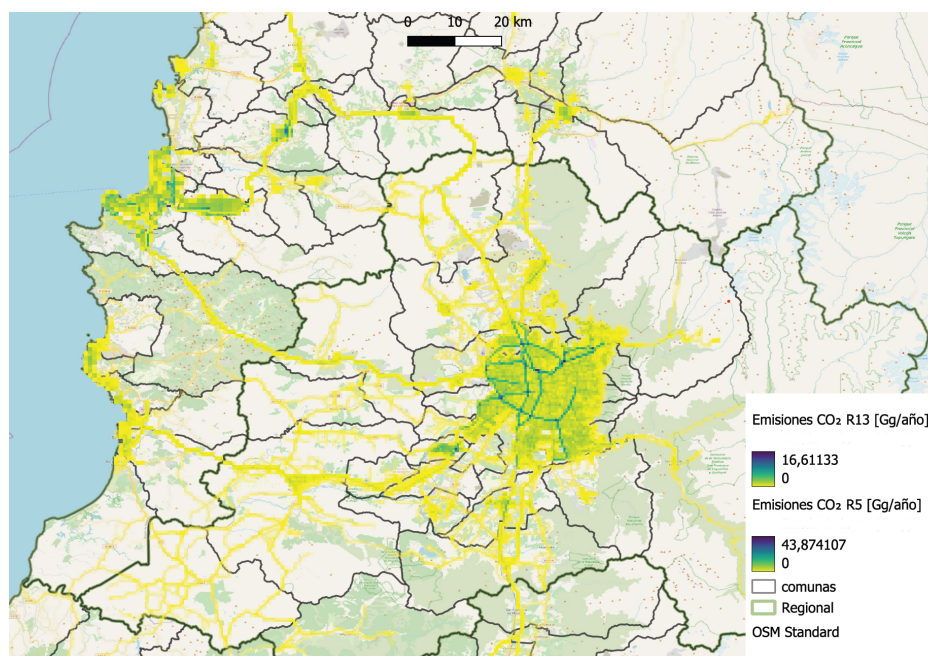


Figura 3.83: Contraste metodológico de desagregación de CO2 terrestre (2024). La Región Metropolitana se grafica a 100mx100m (R13) y la Región de Valparaíso a 1kmx1km (R5). El cambio de área de celda induce un efecto visual sobre la concentración de masa.

puramente un artificio matemático derivado de la discretización del espacio geográfico. Las celdas de la RM contienen nominalmente menos emisiones de forma individual única y exclusivamente porque su área es mucho menor, ya que lógicamente una celda de 1 km<sup>2</sup> en Valparaíso equivale a la suma del área de 100 celdas de 100x100m en la RM. Al diluir la masa total de contaminantes sobre una grilla cien veces más fina, la cantidad asignada a cada cuadrado individual disminuye proporcionalmente, alterando la escala de colores local, no obstante, se tiene que si analizamos las emisiones en términos absolutos, el parque automotriz de la Región Metropolitana emite volúmenes de CO<sub>2</sub> vastamente superiores a los de Valparaíso si ambas regiones se compararan bajo la misma escala territorial. En consecuencia, esta visualización híbrida sirve como un recordatorio crítico de que la lectura de cualquier inventario espacializado debe estar invariablemente condicionado por el conocimiento del área de la unidad de análisis base.

### **3.5. Unificación de la Desagregación Espacial: Matriz Integral de Transporte**

El paso definitivo en la consolidación del inventario espacializado consistió en la fusión geométrica y matemática de las grillas resultantes de cada modo de transporte analizado (terrestre, marítimo y aéreo). Este procedimiento permite obtener una radiografía completa y continua de la presión ambiental ejercida por el sector transporte en su conjunto sobre el territorio nacional para cualquier año de interés. A modo de ejemplo, las Figuras 3.84 y 3.85 presentan las cartografías a escala país de las emisiones totales combinadas para CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, respectivamente.

La perspectiva macroscópica y general que brindan estos mapas nacionales revela la asimetría estructural de las emisiones en Chile. Al analizar detenidamente las imágenes se logra distinguir una densa espina dorsal terrestre que recorre el valle central, la cual se va difuminando hacia los extremos del país. Las rutas marítimas costeras y los vectores rectilíneos de la aviación comercial añaden capas de complejidad que conectan las zonas extremas donde la infraestructura vial pierde predominancia o se interrumpe, como ocurre en la zona de los archipiélagos y fiordos australes. Las escalas de intensidad en ambos mapas (medidas en toneladas por año) reafirman que los focos críticos a nivel país están intrínsecamente ligados a la conurbación de Santiago y a los principales puertos y aeropuertos que conectan la cadena logística.

**Total Transport Emissions of CO2 in Chile (Road, Maritime, Aviation)**

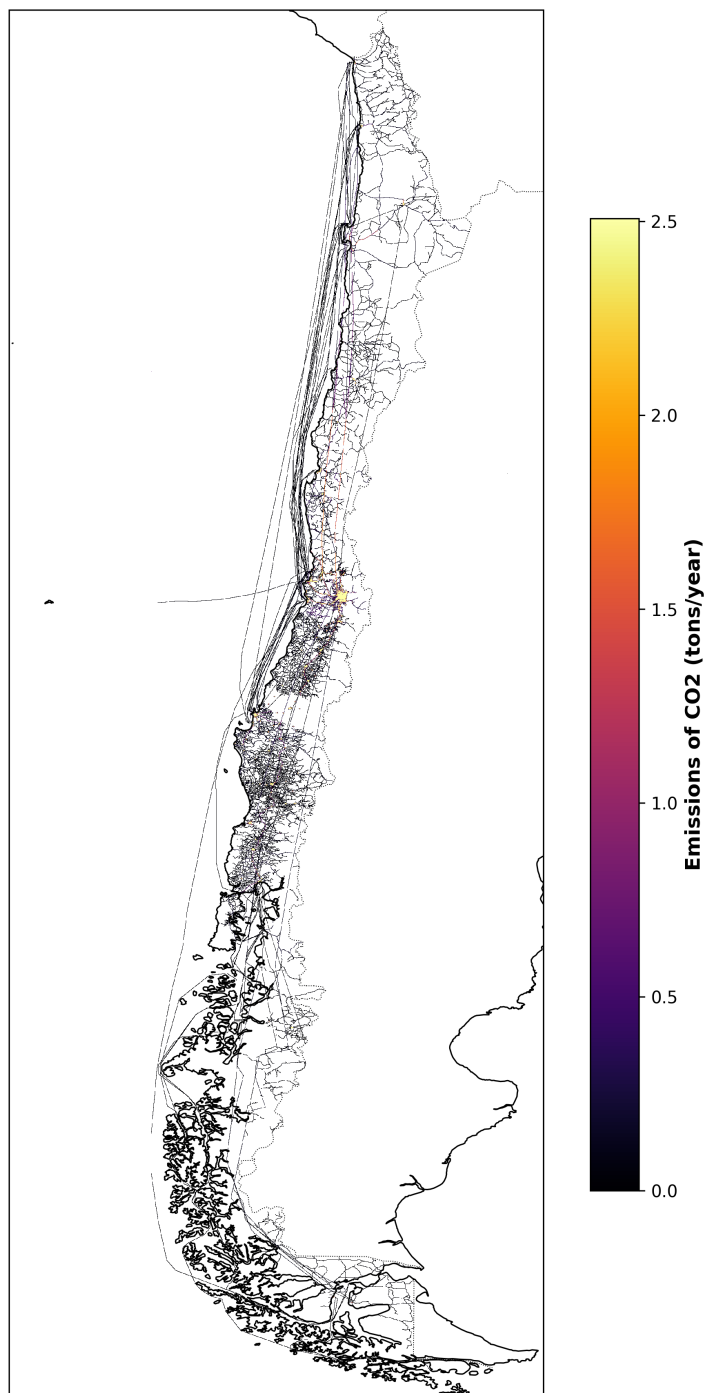


Figura 3.84: Mapa nacional de emisiones totales de CO2 provenientes de los tres modos de transporte (terrestre, marítimo y aéreo) para el año 2023.

**Total Transport Emissions of NOx in Chile (Road, Maritime, Aviation)**

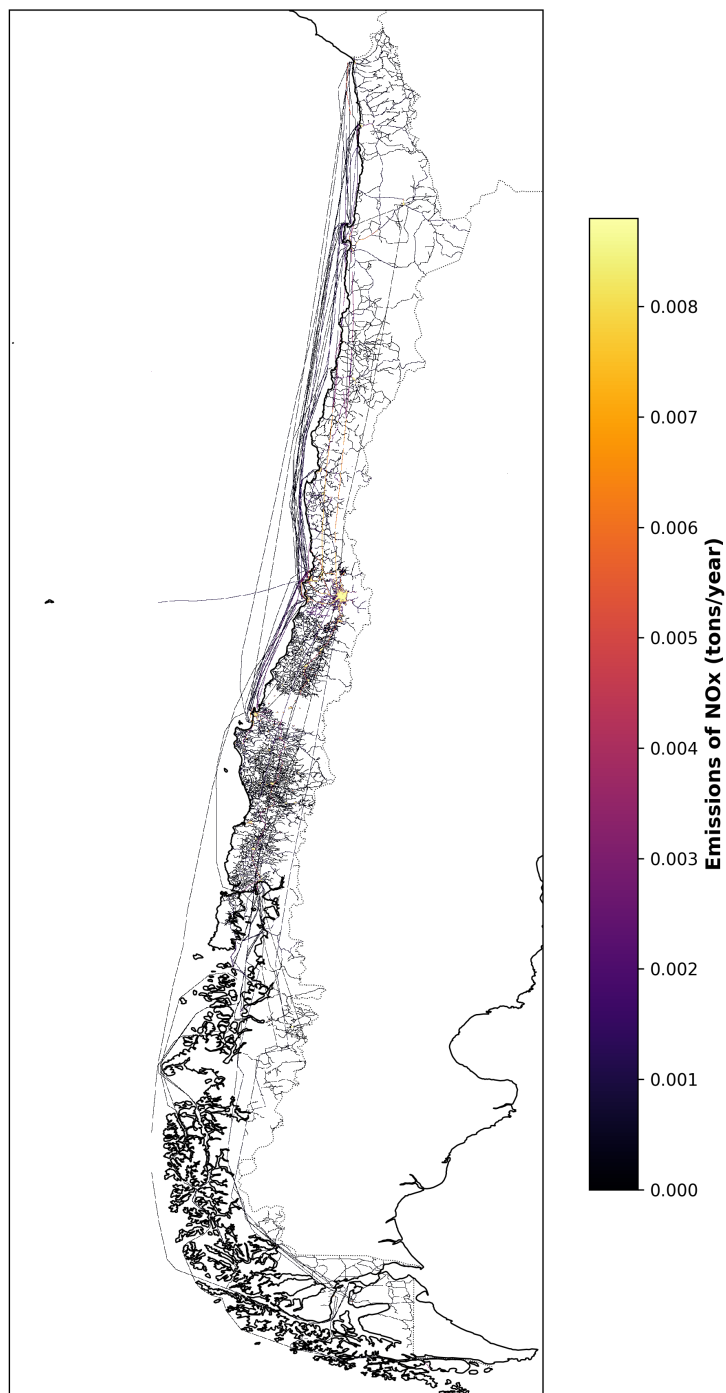


Figura 3.85: Mapa nacional de emisiones totales de NOx provenientes de los tres modos de transporte (terrestre, marítimo y aéreo) para el año 2023.



Ahora bien para comprender con mayor grado de detalle la interacción de estos tres modos de transporte, se generaron cartografías con acercamientos a la macrozona central del país, zona que concentra la mayor pluralidad de operaciones de transporte.

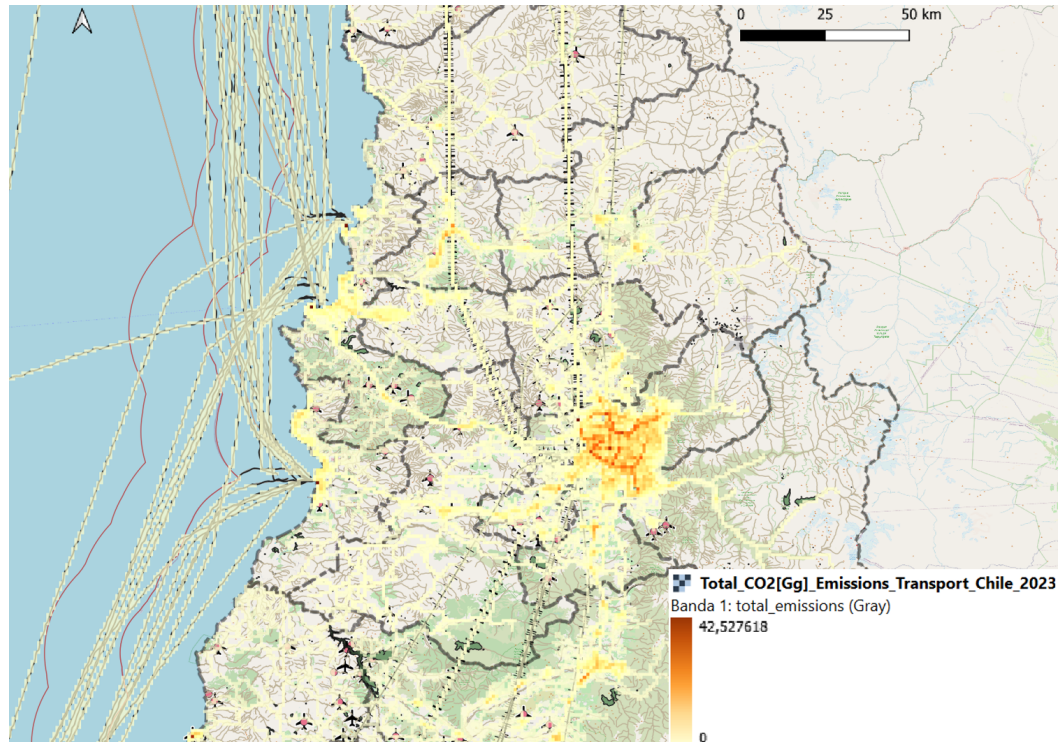


Figura 3.86: Vista detallada de la desagregación espacial unificada de emisiones de CO2 (Gg) en la zona central de Chile.

Al revisar las Figuras 3.86 y 3.87, queda en evidencia la dominancia de la red capilar terrestre, caracterizada por un tejido denso que alcanza sus valores máximos de emisión (tonos anaranjados y rojos) en las vías circundantes de la Región Metropolitana, lo cual corresponde a la autopista Américo Vespucio. Sobre esta vasta red, irrumpen las trazas lineales del sector aéreo cruzando el espacio continental, junto con las franjas de emisión marítima en el borde costero. Esta superposición cartográfica evidencia que, si bien el transporte por carretera genera la mayor cobertura de área impactada, los nodos portuarios y aeroportuarios actúan como fuentes puntuales de emisión extrema cuyas magnitudes por celda logran equiparar e incluso superar a los segmentos más congestionados de las autopistas urbanas como se presentará más adelante.

Por otro lado, se debe mencionar que un desafío metodológico constante durante la unificación de rásteres con naturalezas geométricas tan diversas es el riesgo de truncamiento o sobrescritura de datos, lo que podría llevar a una subestimación del

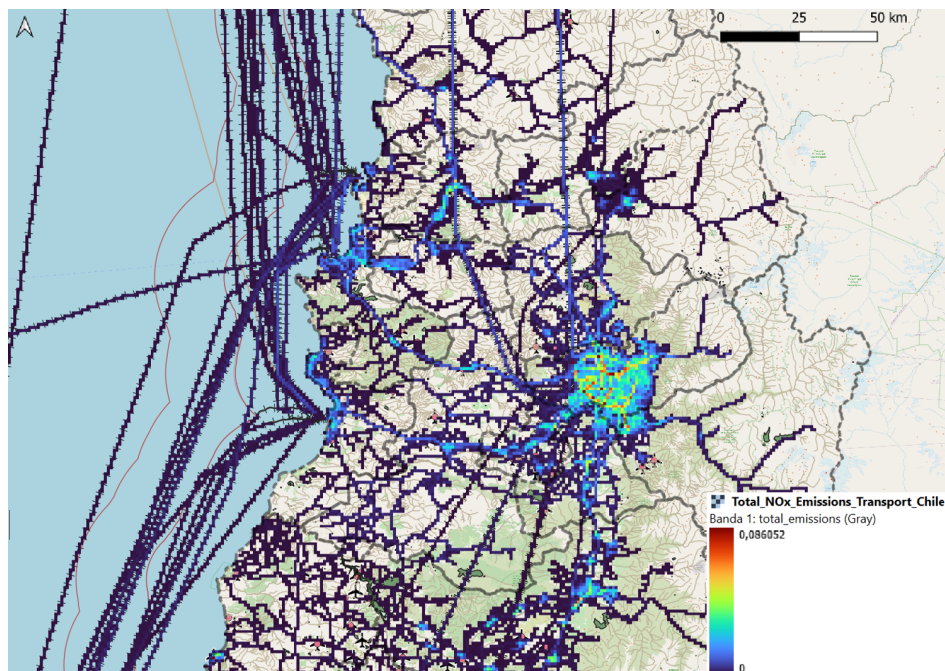


Figura 3.87: Vista detallada de la desagregación espacial unificada de emisiones de NOx (Gg) en la zona central de Chile.

inventario final. Para descartar este error, se realizaron dos procesos en paralelo; Por un lado, se realizó un balance de masa con el fin de asegurar que no se esté perdiendo información en este proceso y que toda la información que entra sea igual a la que sale; Y por otro lado se ejecutó un proceso de verificación cruzada interrogando valores directamente sobre los píxeles de máxima concentración.

Las Figuras 3.88 y 3.89 exponen gráficamente este segundo proceso de validación mencionado anteriormente. Mediante la extracción puntual de información (señalizada con flechas rojas), se comprobó que los valores intrínsecos de la grilla conservan íntegramente las sumatorias de las capas base. Por ejemplo, en la zona costera se identifican celdas portuarias que registran valores de 44.5 y 74.2 Gg de CO<sub>2</sub>, magnitudes que sobrepasan con creces el límite superior de representación visual de la paleta de colores (fijado referencialmente en torno a 42.5 Gg para mejorar el contraste general del mapa). Lo mismo ocurre con el NO<sub>x</sub>, donde las celdas verificadas en los terminales marítimos y aéreos muestran lecturas directas (como 0.88, 1.32 o 1.67 Gg) que superan de largo la saturación roja de la escala del plano. Este sondeo selectivo confirma matemáticamente que la herramienta geoespacial no aplicó ningún tipo de filtro de normalización que haya recortado los picos de emisión. Las toneladas reportadas en los

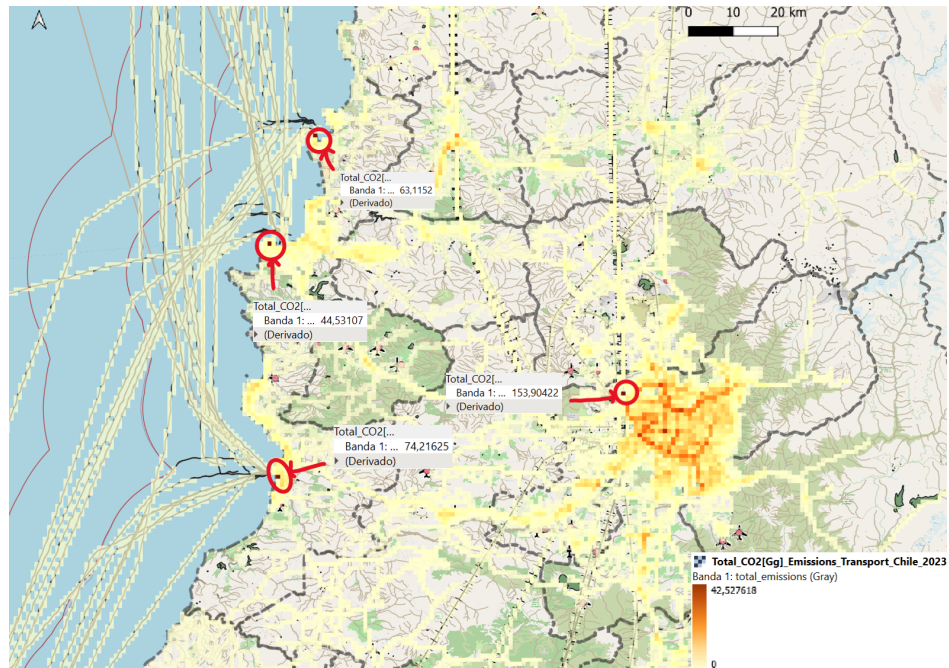


Figura 3.88: Verificación de los valores de emisión acumulados de CO2 (Gg) en puertos y aeropuertos clave de la zona central, asegurando la conservación de los datos tras la unificación espacial.



Figura 3.89: Verificación de los valores de emisión acumulados de NOx (Gg) en puertos y aeropuertos clave, demostrando la integridad matemática del ráster consolidado.



inventarios base originales se encuentran íntegramente depositadas en el mapa final. Con esta certeza, el modelo unificado se valida como un instrumento robusto y preciso, apto para la toma de decisiones y para la posterior alimentación de modelos fotoquímicos de calidad del aire.

### 3.6. Conclusiones del Capítulo

El desarrollo y análisis expuesto en este capítulo ha permitido establecer un catastro bastante detallado y georreferenciado de las emisiones atmosféricas provenientes del sector transporte multimodal en Chile, abordando de manera independiente e integrada sus tres modos fundamentales analizados a lo largo del capítulo. La aplicación de metodologías de desagregación espacial demostró ser una herramienta esencial no solo para cuantificar inventarios, sino para mapear con precisión la presión ambiental real que ejercen los flujos de movilidad sobre el territorio nacional.

Respecto al modo terrestre, quedó en evidencia que la red vial constituye la principal matriz de distribución de contaminantes a nivel superficial, abarcando vastas extensiones geográficas. Las cartografías confirmaron que los ejes estructurantes de la Región Metropolitana y las vías de conexión interurbana hacia la costa en la Región de Valparaíso actúan como los corredores de mayor impacto para  $CO_2$  y  $NO_x$ . Asimismo, se observa claramente que la huella de carbono ( $CO_2$ ) copia casi a la perfección el peso poblacional, saturando la Región Metropolitana a causa de la dependencia extrema del vehículo particular. Por su parte, el material particulado y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) dibujan una geografía distinta, ya que estas sustancias, las cuales dicho sea de paso atacan directo a la salud pública, desplazan sus puntos de mayor intensidad hacia los grandes ejes interurbanos y a las regiones con fuerte vocación extractiva o forestal, como sucede claramente en Antofagasta y el Biobío. En esos territorios, la tracción de carga pesada a diésel impone una presión atmosférica altísima que las métricas tradicionales a nivel país solían camuflar.

Respecto a la radiografía del escenario aéreo, el sistema reveló ser fuertemente radial y estar amarrado operativamente al Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, como era de esperarse. Separar el inventario en las fases LTO y CCD fue una decisión clave que permitió entender el origen físico de los contaminantes. Las maniobras en superficie castigan el entorno de la capital con partículas y gases reactivos, mientras que el régimen de crucero absorbe sin contrapeso más del 90 % del volumen de los gases

de efecto invernadero a nivel nacional. Sumado a lo anterior, la inclusión del Esfuerzo de Transporte (FKM) para calibrar las rutas obligó a reescribir la tabla de jerarquías de emisiones, lo cual fue clave para la correcta asignación del peso ponderado de cada ruta aérea y lo cual luego desembocó en el modelo de desagregación espacial de alta resolución. Gracias a esto quedó comprobado empíricamente que los trayectos australes y de larga distancia hacia zonas aisladas representan vectores de quema de combustible de enorme relevancia que muchas veces se subestiman al mirar únicamente la cantidad neta de despegues.

El abordaje del sector marítimo por su parte llevó la integración de fuentes a un nivel de complejidad sustancial, ya que tomar millones de registros de telemetría satelital (AIS) para empaquetarlos en bases de datos espaciales fue lo que luego permitió transformar un caos de coordenadas en polígonos de calor sumamente concretos. Al aislar lo que ocurre netamente dentro de los recintos portuarios, los números apuntan a la fase de estadía, o también conocida como Puerto (*hotelling*), la cual es la verdadera causante del estrés ambiental en bahías saturadas como San Antonio, Mejillones o la zona de Quintero. El set paramétrico de modelos desarrollados tiene el mérito de discriminar el impacto muelle por muelle, lo cual permite mapear fluctuaciones estacionales que siguen el pulso de las temporadas de exportación y la exigencia térmica de los generadores auxiliares de las naves estacionadas.

Es evidente entonces que la caracterización de los sectores marítimo y aéreo reveló una morfología espacial fuertemente nodal. El procesamiento de datos posicionales evidenció que, si bien las rutas marítimas y las aerovías dibujan vectores de tránsito continuos, la inmensa mayoría de la masa contaminante se satura en las inmediaciones de la infraestructura logística. Esto se refleja de manera crítica en áreas de fondeo de recintos portuarios como por ejemplo San Antonio y Quintero, y también en las trayectorias de aproximación o despegue (LTO) sobre terminales como el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez.

El salto metodológico hacia una alta desagregación espacial con resolución aún más fina, mediante la construcción de grillas de 100 por 100 metros, representó uno de los mayores desafíos técnicos de la investigación. Este nivel de escrutinio fino exigió una capacidad de procesamiento computacional severa para cruzar e interpolar miles de matrices con miles de datos. Sin embargo, los resultados justifican ampliamente la carga operativa, ya que esta escala fina logró aislar fenómenos micro-locales que en mallas estándar, si bien se notaban, pasaban más desapercibidos, tales como las trayectorias exactas de las naves sorteando la geografía confinada de los canales australes o las

órbitas elípticas de los patrones de espera aeronáuticos sobre Santiago. A su vez, el ejercicio comparativo entre resoluciones (Región Metropolitana a  $100\text{m} \times 100\text{m}$  frente a Valparaíso a  $1\text{km} \times 1\text{km}$ ) demostró el efecto de escala cartográfica. Quedó comprobado que la reducción del área de la celda diluye numéricamente la masa asignada por unidad espacial, lo que obliga a interpretar siempre cualquier gradiente visual en estricta relación con su unidad de área base para evitar subestimaciones del impacto ambiental de las zonas más densas.

La consolidación de la Matriz Integral de Transporte logró el objetivo de unificar las capas espaciales de todos los modos operativos del país de manera coherente. Las verificaciones de balance de masa realizadas y de control directo ejecutadas sobre el ráster consolidado probaron que los algoritmos de fusión preservaron la integridad matemática original de los datos, ya que se evidencia la conservación intacta de los valores de emisión máximos en los nodos portuarios y aeroportuarios, los cuales a su vez al superponerse con la extensa red capilar terrestre, valida esta matriz unificada como un instrumento de alta fidelidad. Con ello, las cartografías de alta resolución espacial logradas superan la etapa de un mero inventario estático para convertirse en un insumo técnico robusto, plenamente apto para la posterior calibración de modelos fotoquímicos mediante la ingesta de archivos NetCDF que siguen los rígidos estándares internacionales. Haber anclado las masas de contaminantes a coordenadas geográficas exactas, con flujos verificados a través de balances de masa y una separación tecnológica rigurosa, entrega finalmente las piezas necesarias para evaluar escenarios futuros y dirigir las estrategias de descontaminación de manera verdaderamente quirúrgica.

## 4. Desagregación Temporal

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los modelos realizados reflejados en la desagregación temporal de las emisiones. Cabe destacar que este análisis es fundamental ya que el análisis espacial y sectorial de un escenario base entrega una fotografía detallada del estado actual para un año de estudio o para una región de tiempo analizada, pero resulta estático frente a la inercia de un sistema tan complejo como el transporte. Por otro lado, para calibrar adecuadamente las proyecciones hacia el año 2050, lo cual se profundizará en el siguiente capítulo, es imprescindible reconstruir y analizar la serie de tiempo histórica y evaluar como se comportan temporalmente las emisiones de cada modo de transporte. Al evaluar la evolución de los contaminantes desde 1990, se logran identificar las tendencias subyacentes que gobiernan el sector, las cuales incluyen el crecimiento natural del parque automotriz, considerando los 3 modos de transporte, los ciclos macroeconómicos y el impacto empírico de la penetración tecnológica a lo largo de las décadas.

### 4.1. Transporte Terrestre

Para normalizar las distintas magnitudes de los contaminantes, hacerlas comparables en un mismo plano y en función de la información obtenida y recopilada en el levantamiento masivo de información, es que se estableció el año 1990 como índice base de valor unitario para este análisis. La proyección de estas curvas normalizadas a nivel nacional revela un comportamiento fuertemente dicotómico entre los gases de efecto invernadero y los contaminantes locales.

La figura 4.1 expone la física de este fenómeno. Por una parte, las curvas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ) escalan de manera sostenida y similar, lo cual era de esperarse y tiene relación con resultados obtenidos de estudios anteriores, estas emisiones superan en la actualidad más del triple de sus valores iniciales. Esta tendencia responde de manera directa al aumento neto del consumo de combustibles fósiles impulsado por la expansión logística y la explosión de la tasa de motorización civil. Sin embargo, en la parte inferior del gráfico se materializa el éxito de las normativas ambientales. Contaminantes como el monóxido de carbono ( $CO$ ), los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC) y el metano ( $CH_4$ ) experimentan un desplome sostenido a partir del año 2000.

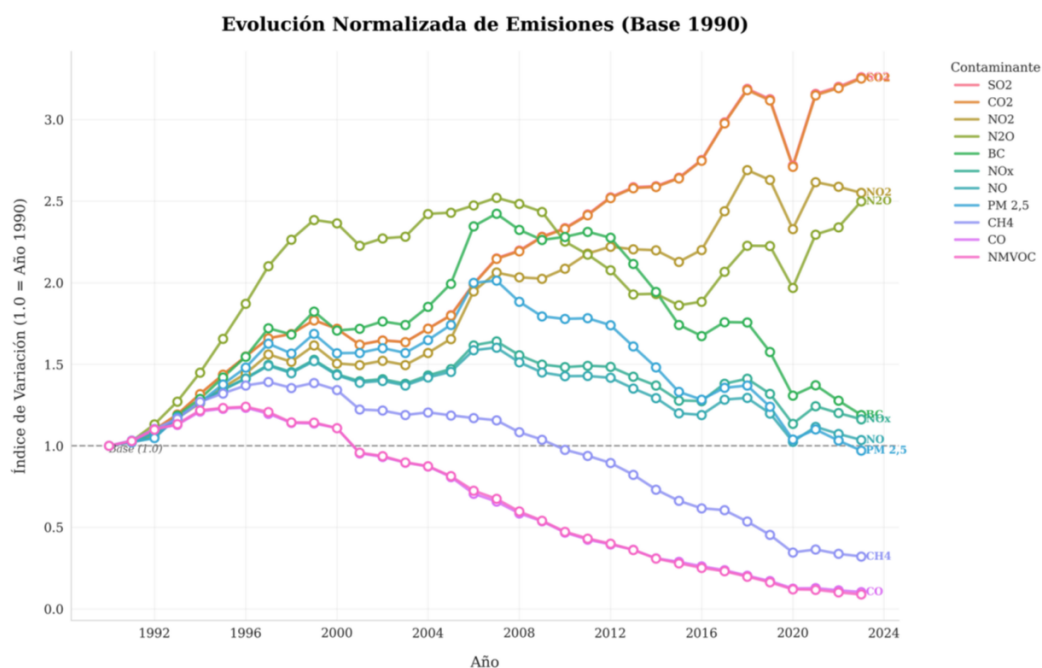


Figura 4.1: Trayectoria histórica normalizada de emisiones del transporte terrestre (Base 1990 = 1). Se evidencia el desacople entre contaminantes globales ( $CO_2$ ) y locales ( $CO$ , NMVOC) producto del recambio tecnológico.

A pesar de que hoy circulan millones de vehículos más que en 1990, la exigencia progresiva de estándares de emisión (Normas Euro y EPA) y la masificación de los sistemas de post-tratamiento, destacando especialmente al convertidor catalítico de tres vías, lograron contener y revertir el daño a la calidad del aire local, forzando un desacople definitivo entre crecimiento vehicular y toxicidad.

Ahora, para llevar este análisis macroscópico a la realidad territorial, se ha procedido a desagregar históricamente los inventarios a nivel regional. Tomando como casos de estudio el  $CO_2$  y el  $CO$ , las trayectorias reflejan el impacto de la asimetría demográfica e industrial del país.

El trazado del dióxido de carbono regionalizado (figura 4.2) reafirma que la demanda energética del transporte es un espejo de la actividad económica. Prácticamente la totalidad de las regiones multiplican sus índices históricos de consumo. Un aspecto analítico vital que valida la sensibilidad del modelo es la caída sincrónica y abrupta que sufren todas las curvas en el año 2020. Esta disrupción geométrica cuantifica con precisión el cese de operaciones y la restricción de movilidad impuestos durante la pandemia de COVID-19, seguido de un rebote casi inmediato en los años posteriores

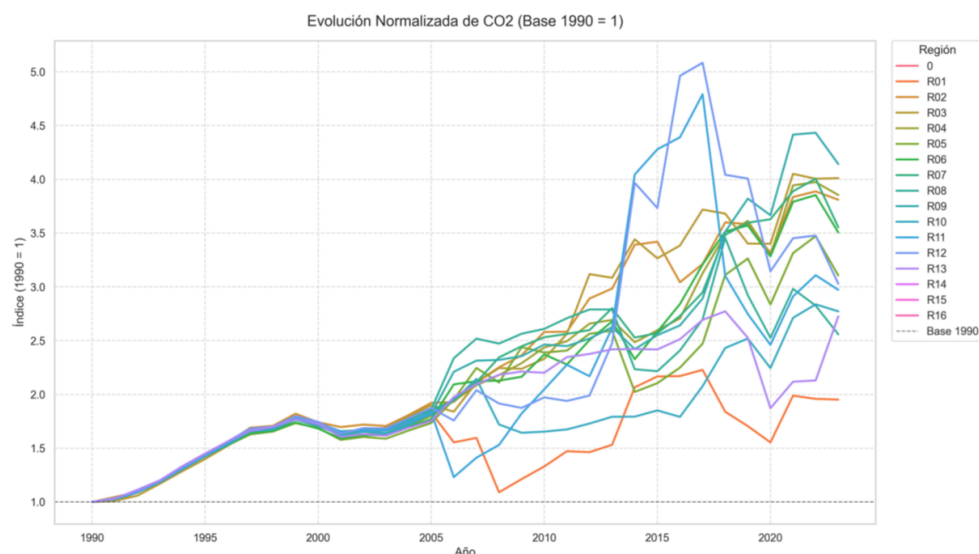


Figura 4.2: Evolución regional normalizada de las emisiones de  $CO_2$  (Base 1990 = 1). Las fluctuaciones capturan con alta sensibilidad los ciclos económicos y el impacto del confinamiento en 2020.

producto de la reactivación económica y el auge del comercio electrónico.

La vereda opuesta la protagoniza la curva del monóxido de carbono expuesta en la figura 4.3. La mitigación tecnológica no discriminó por geografía, dado que es evidente observar el comportamiento casi idéntico de todas las regiones, desde los núcleos mineros del norte hasta las zonas extremas, estas trazan una parábola descendente a partir de fines de los años noventa. El recambio paulatino de vehículos antiguos carburados por flotas con inyección electrónica y catalizadores empujó los niveles actuales a una fracción marginal de la línea base.

Este contraste histórico fundamenta una de las principales premisas para los escenarios futuros de esta investigación, el cual responde a que las normativas de combustión ya agotaron su margen de mayor impacto sobre los contaminantes locales. Lograr reducciones sustanciales en el futuro, especialmente apuntando a la carbono neutralidad, ya no dependerá de optimizar el motor de combustión interna, sino de erradicarlo mediante un cambio sistémico hacia la electromovilidad y los combustibles sintéticos nulos en carbono.

La distribución temporal de las emisiones no solo está gobernada por la evolución macroeconómica a largo plazo, sino que presenta una fuerte dependencia de los ciclos estacionales a nivel intra-anual. Particularmente en el ámbito interurbano, el flujo vehicular responde a patrones de actividad turística, ciclos de cosecha agrícola y ritmos

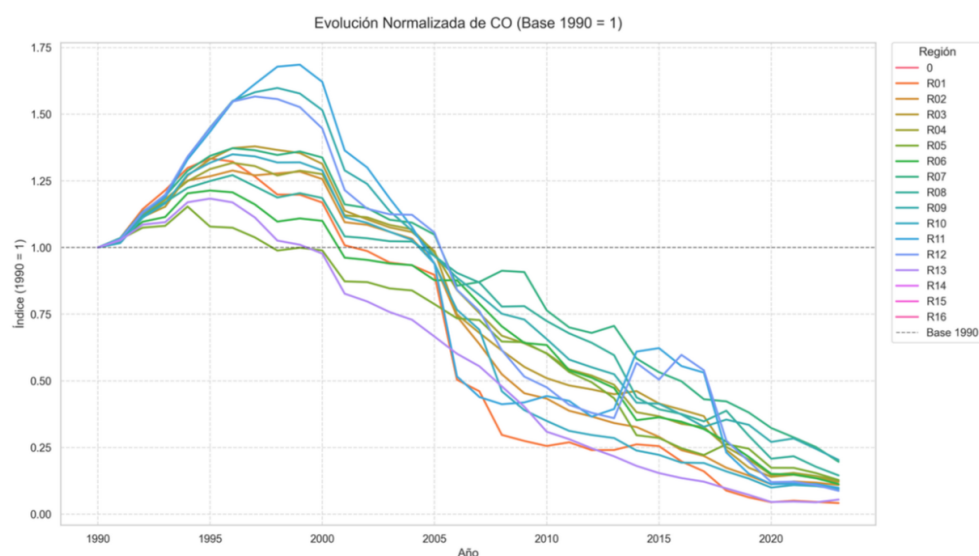


Figura 4.3: Trayectoria regional normalizada del monóxido de carbono ( $CO$ ) respecto a 1990. Muestra una contención tecnológica exitosa y transversal en todas las zonas del país.

industriales que alteran significativamente la carga de contaminantes liberados a la atmósfera mes a mes. Para parametrizar esta variabilidad en el modelo de emisiones, se construyeron perfiles mensuales de actividad para cada segmento de la flota. Con el fin de optimizar el análisis transversal, los datos originales del modelo fueron agrupados y limpiados, permitiendo aislar la huella temporal específica de cada categoría vehicular a lo largo del año. Los resultados numéricos de esta asignación se detallan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Perfiles de distribución temporal para el transporte interurbano (%). Se evidencia la marcada estacionalidad estival en vehículos particulares y motocicletas frente a la estabilidad del transporte de carga pesada.

| Categoría      | Ene  | Feb  | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov  | Dic  |
|----------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| <b>VLP</b>     | 10.2 | 10.2 | 8.0 | 7.6 | 7.5 | 7.0 | 7.9 | 7.6 | 8.2 | 8.2 | 8.2  | 9.5  |
| <b>CAM MED</b> | 9.0  | 8.4  | 8.9 | 8.3 | 7.9 | 7.4 | 7.7 | 7.9 | 7.6 | 8.5 | 8.7  | 9.6  |
| <b>CAM PES</b> | 8.3  | 8.4  | 9.2 | 8.8 | 8.3 | 7.7 | 8.0 | 8.1 | 7.7 | 8.4 | 8.4  | 8.7  |
| <b>BUS</b>     | 9.2  | 8.9  | 8.2 | 7.9 | 7.9 | 7.6 | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 8.6 | 8.5  | 9.0  |
| <b>MOT</b>     | 11.8 | 10.8 | 9.7 | 7.6 | 6.2 | 4.9 | 5.1 | 5.9 | 7.4 | 9.0 | 10.1 | 11.4 |

La revisión de la matriz porcentual confirma la física del problema de movilidad. Los vehículos livianos de pasajeros (VLP) y las motocicletas (MOT) exhiben variaciones extremas, concentrando más del 30 % de su actividad anual en el trimestre estival (diciembre a febrero), lo cual sigue una lógica fuerte y marcada en la movilidad nacional. Las motocicletas por su parte, siendo altamente sensibles a las condiciones meteorológicas y el factor térmico, sufren una caída abrupta en los meses de invierno, registrando apenas un 4.9 % en junio. Por otra parte, el transporte logístico (CAM PES y CAM MED) muestra una curva de distribución mucho más rígida. La fluctuación entre su mes de mayor y menor tráfico no supera los 1.5 puntos porcentuales, lo cual es coherente con las operaciones ininterrumpidas del sector minero, forestal y de abastecimiento nacional.

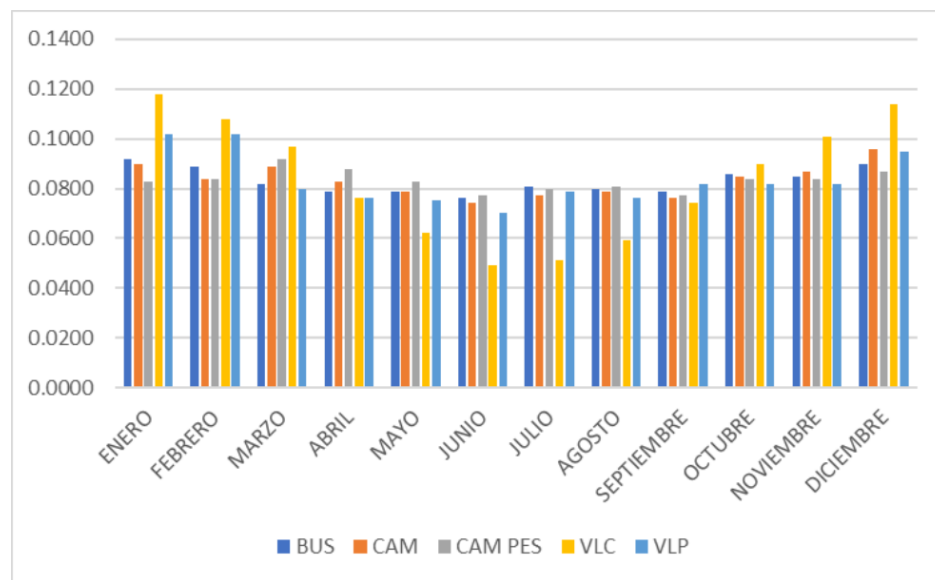


Figura 4.4: Desglose comparativo de los perfiles de actividad mensual por categoría vehicular en rutas interurbanas. Resaltan los picos de movilidad particular durante la época estival frente a la inercia plana de los camiones.

Al trasladar estos factores a una representación gráfica, la magnitud del impacto estacional queda expuesta con absoluta claridad. La figura 4.4 desagrega el aporte individual, confirmando visualmente el salto cuantitativo de los VLP y buses durante los meses de vacaciones.

Finalmente, la integración del volumen total de la flota materializa el comportamiento global del sistema de transporte, tal como ilustra la figura 4.5. El gráfico apilado define una geometría cóncava a lo largo del año. Esta depresión que toca fondo en el



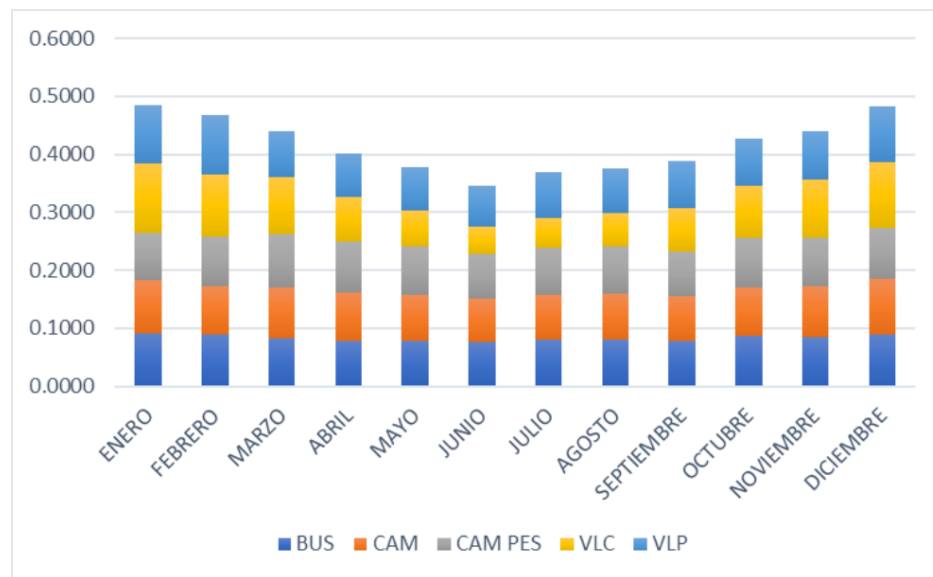


Figura 4.5: Distribución acumulada de la actividad interurbana a lo largo del año. La sumatoria expone una depresión característica en la movilidad global durante los meses de invierno (junio y julio).

mes de junio, responde a la retracción casi total de la movilidad turística interregional, dejando la red vial operada mayoritariamente por los flujos de carga comercial. Esta dinámica obliga a formular estrategias de mitigación flexibles, reconociendo que la presión ambiental sobre los corredores logísticos cambia drásticamente de actores dependiendo de la época del año.

Ahora bien, descendiendo en la escala de resolución temporal, la correcta parametrización de los inventarios de emisiones, especialmente en los núcleos urbanos, exige comprender cómo varía la movilidad a lo largo de los días de la semana y las horas del día especialmente si hablamos de flujos urbanos. A diferencia del transporte interurbano, gobernado por la estacionalidad mensual, el flujo interno de las ciudades y sus anillos periféricos está dominado por el pulso laboral y logístico de la semana hábil.

La construcción de estos perfiles de alta resolución representó uno de los mayores desafíos en el manejo de datos de esta investigación. La estructuración de las curvas de actividad horaria se logró mediante el procesamiento masivo y la fusión de múltiples fuentes de información empírica. Esto incluyó bases de datos de flujos vehiculares proporcionadas por entidades oficiales del Ministerio de Obras Públicas y el Ministerio de Transportes, registros de pódicos de telepeaje, y series de datos de flujo y composición del parque obtenidas mediante diversas solicitudes por la Ley de Transparencia.

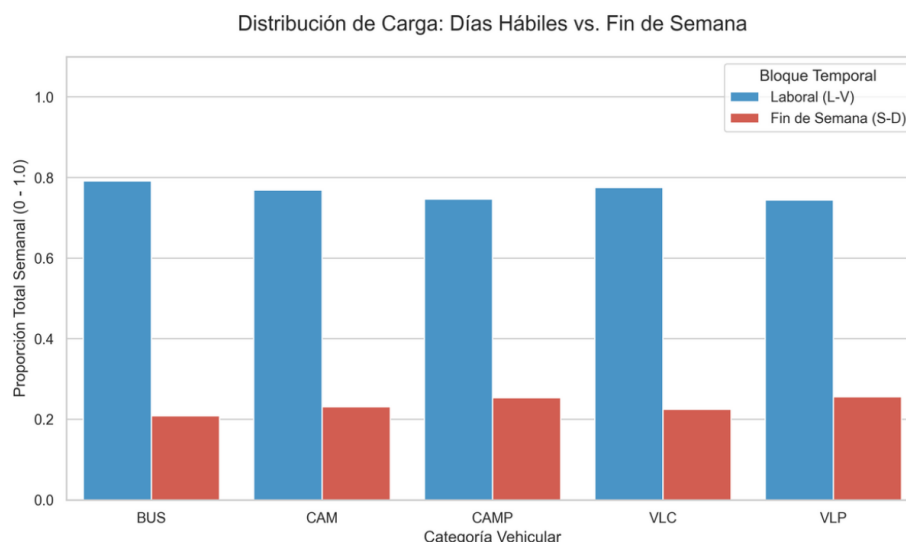


Figura 4.6: Distribución de la carga vehicular comparando el bloque laboral (Lunes a Viernes) frente al fin de semana. Se constata que más del 70 % de la movilidad semanal ocurre durante los días hábiles.

El primer hallazgo de este levantamiento de datos se ilustra en la figura 4.6. Al agrupar la actividad, se observa un patrón transversal a todas las categorías vehiculares, dado que es evidente que el bloque laboral (lunes a viernes) concentra abrumadoramente la proporción total de kilómetros recorridos, dejando al fin de semana con una participación reducida que oscila cerca del 20-25 %.

Para observar el desglose diario de esta carga, se generaron curvas de variabilidad y mapas de calor que permiten identificar los días de mayor presión ambiental sobre la red.

El análisis expuesto en la figura 4.7 revela que el flujo no es perfectamente plano durante la semana laboral. Si bien de lunes a jueves la proporción de distribución se mantiene constante e invariante, el día viernes experimenta un alza significativa en todas las categorías, marcando el máximo semanal de intensidad de actividad (> 15,7 % para vehículos livianos y pesados). Esta anomalía se logra atribuir a la superposición de los viajes logísticos de cierre de semana con los desplazamientos recreativos adelantados y el éxodo vehicular hacia la periferia. Posteriormente, la curva se desploma bruscamente el día domingo, momento que registra los niveles de emisión más bajos del sistema terrestre. Por otra parte, para que el modelo de emisiones pueda calcular los contaminantes hora a hora, toda esta variabilidad fue tabulada en matrices de factores de distribución horaria, diferenciando el comportamiento en tres tipologías de día, corres-

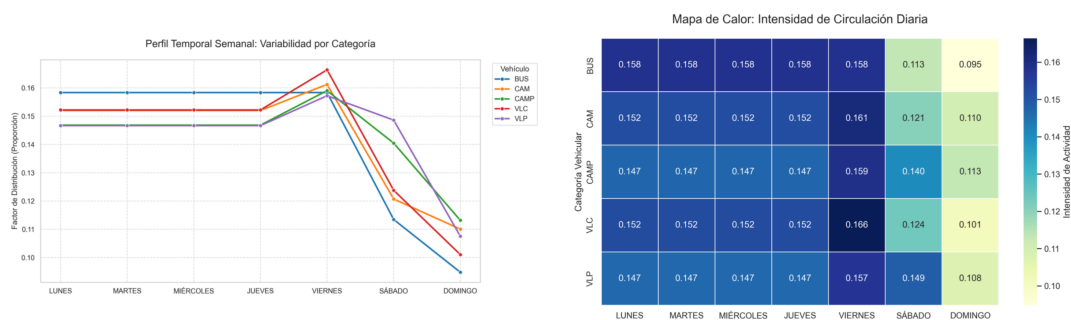


Figura 4.7: Análisis de intensidad circulatoria por día de la semana. Izquierda: Curvas de distribución proporcional. Derecha: Mapa de calor de intensidad diaria. Ambos gráficos confirman que el día viernes representa el pico máximo de actividad semanal para la mayoría de los segmentos.

pondiente a los siguientes bloques: bloque Lunes-Jueves (L-J), Viernes (V), y fines de semana/festivos (D/S).

A modo de ejemplo, la tabla 4.2 presenta un extracto directo de la base de datos consolidada utilizada como *input* para el modelo computacional. Esta matriz refleja la transición de los factores de ponderación entre el final del día domingo y la madrugada del bloque hábil, estructurando de manera explícita la firma temporal de las distintas categorías analizadas.

Tabla 4.2: Fragmento de la matriz de datos crudos empleada para la modelación. Muestra los factores de distribución fraccional estructurados por hora y tipología de día.

| Bloque | Val 1      | Val 2      | Val 3      | Val 4      | Val 5      | Hora     | Tipo Día | Factor V   |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|------------|
| 19 D   | 0.05699964 | 0.06169269 | 0.07302894 | 0.06402296 | 0.06738215 | 19:00:00 | L-J      | 0.07704655 |
| 20 D   | 0.05699964 | 0.02673873 | 0.05073772 | 0.03976446 | 0.06597351 | 20:00:00 | L-J      | 0.06714821 |
| 21 D   | 0.05299857 | 0.02610928 | 0.04372018 | 0.03860364 | 0.06487817 | 21:00:00 | L-J      | 0.05056180 |
| 22 D   | 0.04899749 | 0.04807107 | 0.05481809 | 0.05185547 | 0.05741107 | 22:00:00 | L-J      | 0.03718566 |
| 23 D   | 0.04304511 | 0.05028940 | 0.04411735 | 0.04637612 | 0.03786387 | 23:00:00 | L-J      | 0.02648475 |
| 0 L-J  | 0.01867967 | 0.00668229 | 0.00716087 | 0.01325419 | 0.02047605 | 00:00:00 | V        | 0.02512014 |
| 1 L-J  | 0.00740185 | 0.00221498 | 0.00210890 | 0.00602382 | 0.01197963 | 01:00:00 | V        | 0.01266929 |
| 2 L-J  | 0.00370093 | 0.00060893 | 0.00042946 | 0.00227404 | 0.00643601 | 02:00:00 | V        | 0.00720839 |
| 3 L-J  | 0.00370093 | 0.00027821 | 0.00029876 | 0.00101969 | 0.00383837 | 03:00:00 | V        | 0.00436872 |
| 4 L-J  | 0.00370093 | 0.00017927 | 0.00022407 | 0.00093533 | 0.00313661 | 04:00:00 | V        | 0.00262123 |
| 5 L-J  | 0.00370093 | 0.00075580 | 0.00068082 | 0.00177646 | 0.00463515 | 05:00:00 | V        | 0.00283967 |
| 6 L-J  | 0.05101275 | 0.00222567 | 0.00163737 | 0.00415673 | 0.00871751 | 06:00:00 | V        | 0.00524246 |
| 7 L-J  | 0.08222056 | 0.01272009 | 0.01318132 | 0.01827935 | 0.04204671 | 07:00:00 | V        | 0.01376147 |

La granularidad máxima del análisis se alcanza al modelar las emisiones hora a hora. La Figura 4.8 despliega el perfil temporal integrado de  $CO_2$  a lo largo de las 168 horas de la semana para la Región Metropolitana para el año 2023. En este gráfico es posible identificar claramente los picos de congestión matutinos y vespertinos que ocurren de lunes a viernes.

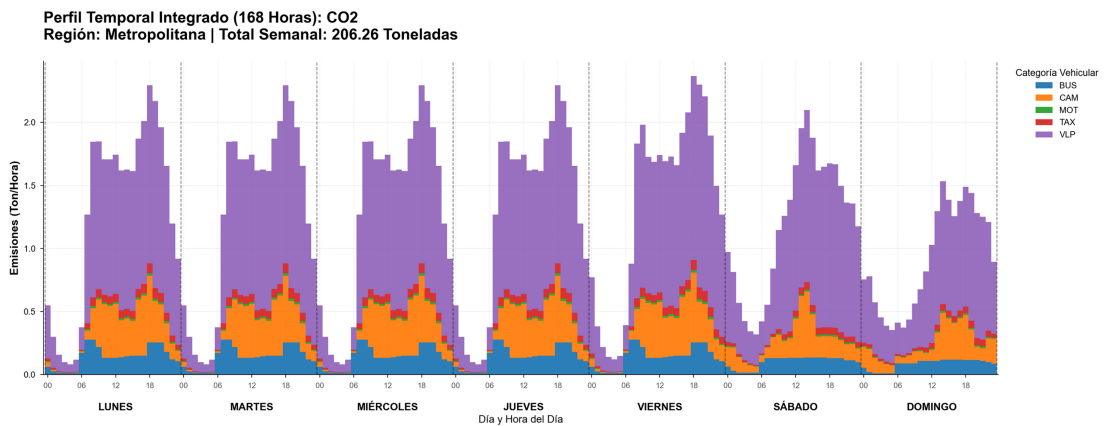


Figura 4.8: Perfil temporal integrado (168 horas) de emisiones de  $CO_2$  en la Región Metropolitana.

Para estudiar los momentos críticos del día de forma cíclica, se implementó un reloj de fases diarias. La Figura 4.9 ilustra las emisiones de  $NO_x$  normalizadas al peak diario, contrastando el comportamiento de camiones pesados, vehículos comerciales y particulares a lo largo de las 24 horas del día.

Finalmente, la dimensión temporal debe acoplarse con la dimensión territorial para una caracterización completa. La Figura 4.10 expone una captura de esta integración a las 14:00 horas, vinculando la curva del ciclo diario de emisiones de  $CO_2$  con su correspondiente distribución espacial instantánea sobre la red vial de la capital.

Más allá del análisis volumétrico, la alta resolución temporal logra evidenciar hallazgos cruciales sobre la composición termodinámica de la flota en circulación. La figura 4.11 presenta la evolución de la huella química del sector, expresada a través del ratio adimensional entre los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y el material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ).

El trazado de esta huella demuestra que la matriz de emisiones no es constante. Durante el horario diurno, el ratio se estabiliza en torno a 50. Sin embargo, durante la madrugada (entre las 01:00 y las 05:00 horas), el indicador experimenta un alza significativa, rozando un valor de 70. Esta anomalía química se fundamenta en la física

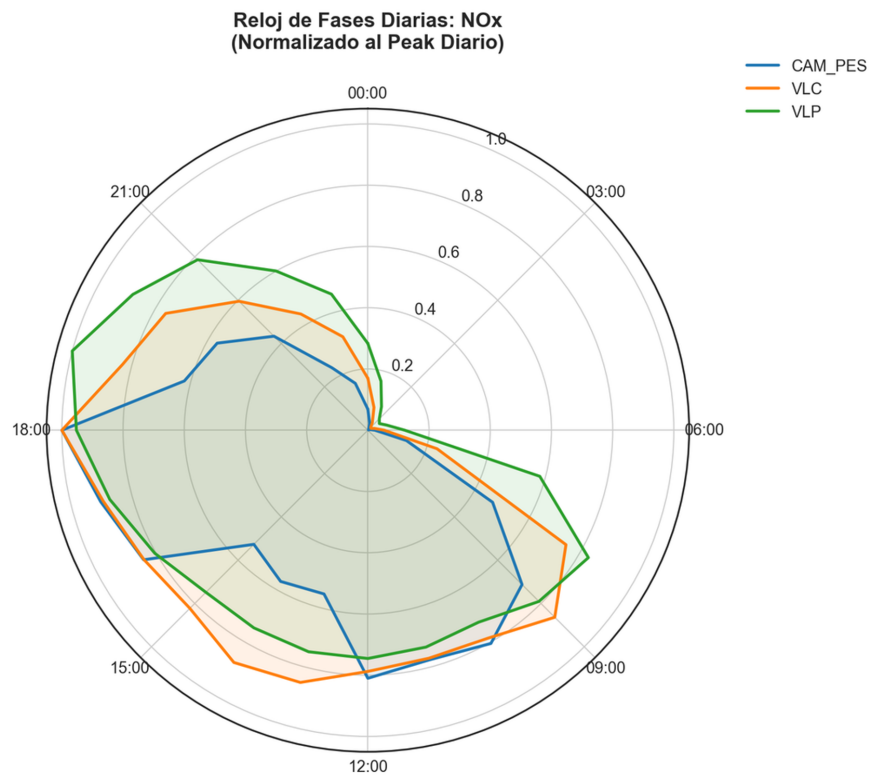


Figura 4.9: Reloj de fases diarias para emisiones de NOx, normalizado al peak horario.

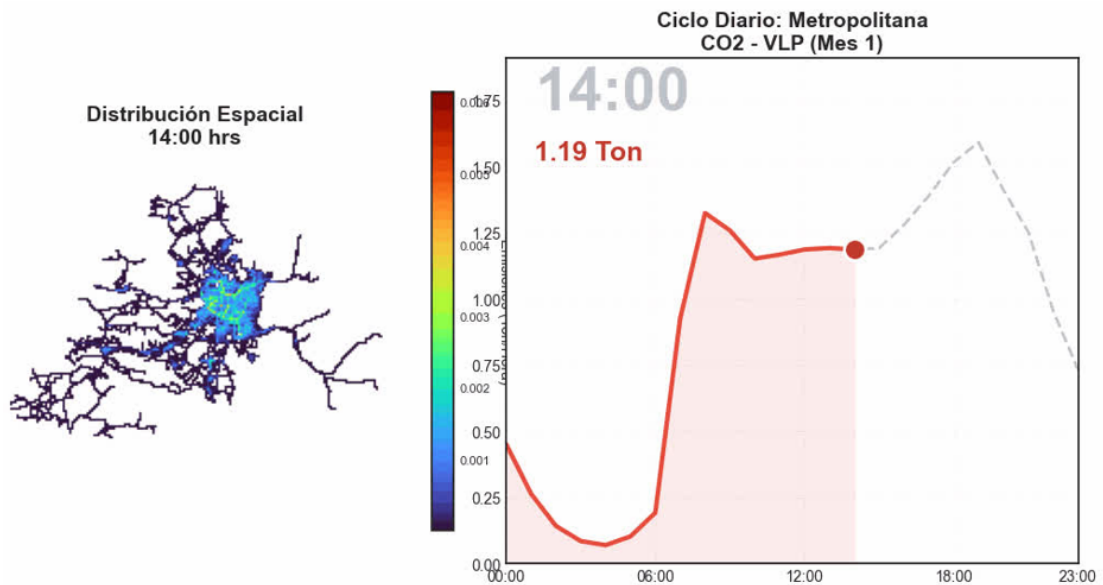


Figura 4.10: Integración espacio-temporal: Ciclo diario de emisiones y su distribución espacial sobre la red a las 14:00 hrs.

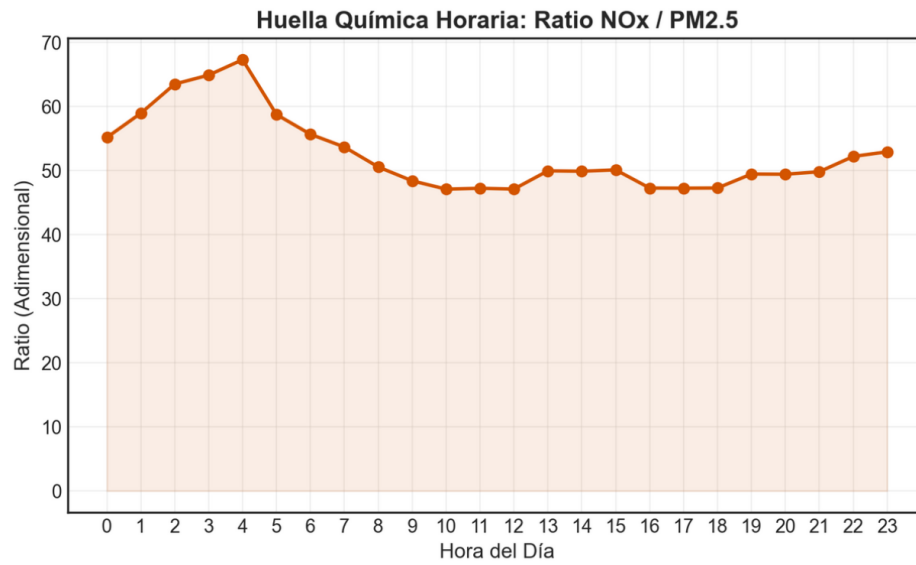


Figura 4.11: Variabilidad horaria del ratio químico  $NO_x/PM_{2.5}$ . El incremento durante la madrugada responde a la desaparición del parque liviano y la predominancia del transporte de carga diésel interurbano.

del transporte, en donde se debe considerar y tener presente que durante la noche, el flujo de vehículos livianos particulares cae drásticamente, dejando la red vial operada casi en su totalidad por camiones y buses interurbanos de ciclo diésel. Estos motores pesados operan con altas temperaturas de combustión que disparan la generación de  $NO_x$  en proporción al material particulado, alterando la firma química de la atmósfera nocturna. La principal ventaja operativa de contar con una modelación espacial y temporal de esta magnitud es la capacidad de evaluar ex-ante medidas de Gestión de la Demanda de Transporte (TDM, por sus siglas en inglés). Para demostrar la aplicabilidad de la herramienta, se simularon dos escenarios de intervención política directa sobre el tráfico de la capital.

El primer escenario, expuesto en la figura 4.12, evalúa una restricción de circulación del 50 % focalizada exclusivamente en vehículos livianos (VLP) durante la ventana crítica matinal (07:00 a 11:00 horas). El área achurada en la gráfica de series de tiempo cuantifica con exactitud la masa de dióxido de carbono mitigada por la medida. Paralelamente, el mapa de calor adjunto localiza estas emisiones evitadas, demostrando que el alivio se concentra fuertemente en el núcleo histórico y comercial de la ciudad, donde la congestión de pasajeros es más aguda.

En contraste, el segundo escenario (figura 4.13) apunta a una política radical de

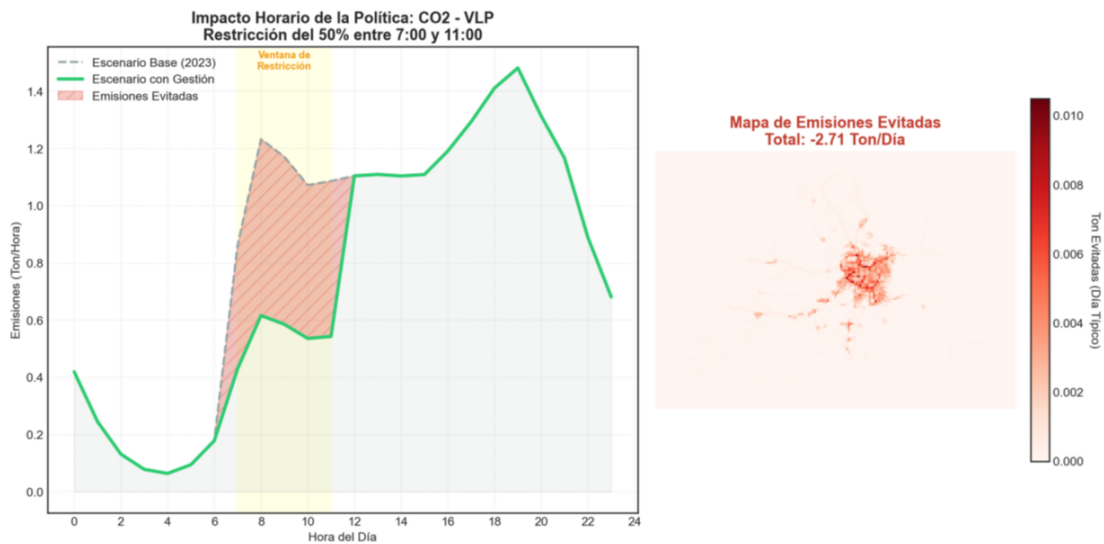


Figura 4.12: Simulación de impacto para una restricción del 50 % a vehículos livianos (VLP) entre las 07:00 y 11:00 horas. El modelo cuantifica las toneladas de  $CO_2$  evitadas y espacializa el beneficio sobre el radio céntrico de la capital.

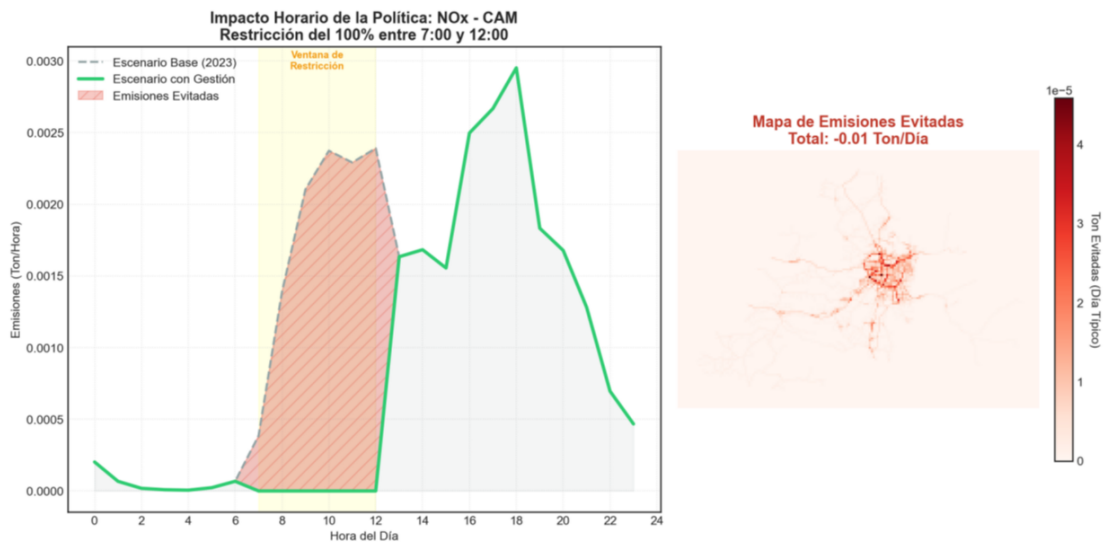


Figura 4.13: Evaluación de una restricción total (100 %) para la circulación de camiones (CAM) durante la mañana (07:00 a 12:00 horas). Se observa el severo recorte temporal de  $NO_x$  y su foco de alivio espacial sobre el anillo periférico.

calidad del aire, en donde se simula la prohibición total (100 %) de circulación de camiones de carga (CAM) en horario de mañana (07:00 a 12:00 horas). El efecto sobre los óxidos de nitrógeno es inmediato, llevando la curva a cero durante el tramo intervenido. La particularidad de este escenario se evidencia en su huella espacial, dado que al observar la imagen y a diferencia de los VLP, las toneladas evitadas por los camiones dibujan de color rojo un poco más intenso el anillo de Circunvalación Américo Vespucio y los ejes de las autopistas concesionadas urbanas, confirmando que la contaminación pesada es un fenómeno periférico e industrial dentro de la matriz capitalina.

Por otro lado, el estudio de la variabilidad temporal y la distribución espacial de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) permite identificar los patrones de consumo energético y movilidad dentro de las principales redes urbanas e interurbanas. A continuación, se presenta la evaluación del comportamiento de la carga contaminante nacional a lo largo de un ciclo diario de 24 horas, junto con su correspondiente expresión territorial en nodos críticos.

La evolución del índice de carga de emisiones a nivel nacional se detalla en la Figura 4.14, reflejando las fluctuaciones asociadas a los ciclos de actividad socioeconómica.

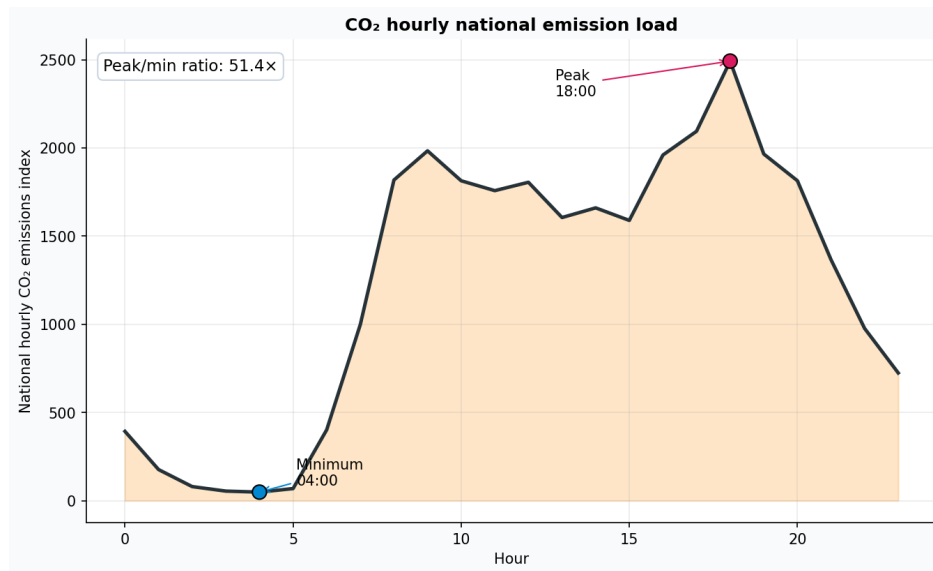


Figura 4.14: Evolución temporal del índice de carga nacional de emisiones horarias de CO<sub>2</sub>.

El comportamiento de la curva de la Figura 4.14 expone una marcada tendencia diurna. El mínimo absoluto se registra a las 04:00 horas, intervalo que coincide con el



cese casi total del transporte público, comercial y de las actividades industriales ligeras. A partir de las 05:00 horas se evidencia un incremento abrupto debido al inicio de la jornada laboral, configurando una meseta de alta emisión durante el día con un pico intermedio hacia el mediodía. El máximo absoluto ocurre a las 18:00 horas, impulsado principalmente por la congestión vehicular de retorno residencial. La relación entre el punto de máxima y mínima demanda alcanza un factor de 51,4×, lo que subraya la alta sensibilidad temporal del inventario antropogénico.

Para correlacionar estos picos temporales con su impacto geoespacial, la Figura 4.15 expone el contraste de la intensidad de emisión en la geografía de la zona central en cuatro horarios estratégicos.

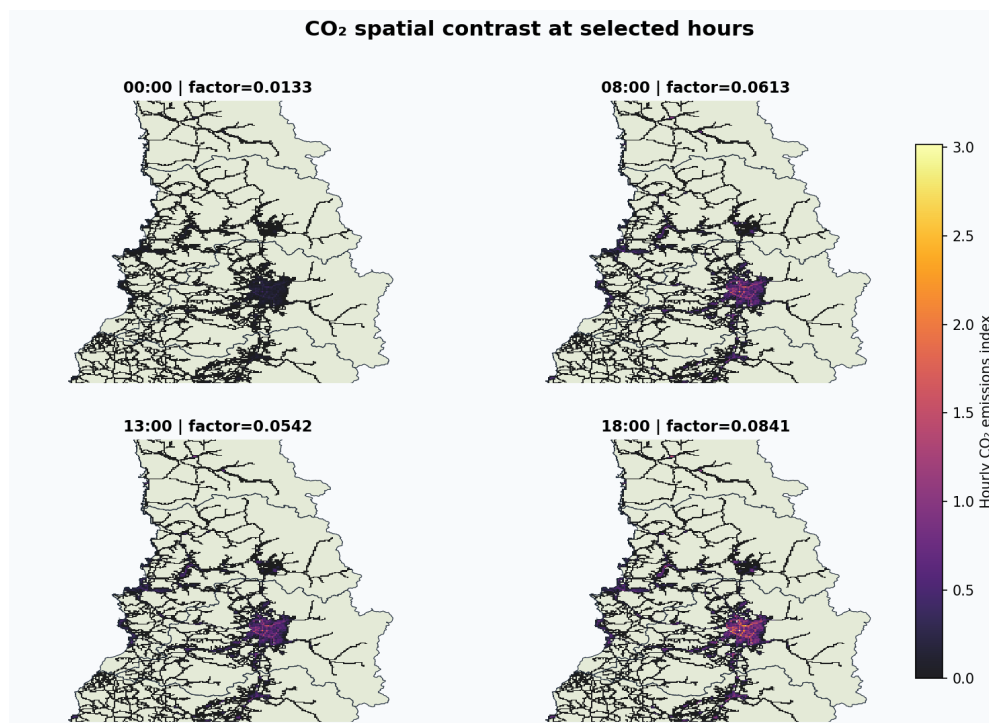


Figura 4.15: Distribución espacial y contraste del índice de emisiones de CO<sub>2</sub> en la zona central para ventanas horarias seleccionadas.

La distribución espacial mapeada en la Figura 4.15 confirma que el núcleo urbano consolidado del Gran Santiago opera como el principal foco emisor continuo, manteniendo niveles perceptibles incluso en la madrugada (00:00 horas, factor = 0,0133). Durante las horas punta de las 08:00 y las 18:00 horas, los factores de escala aumentan significativamente a 0,0613 y 0,0841 respectivamente, donde no solo se densifica el área metropolitana, sino que se activan nítidamente los ejes lineales correspondientes

a las autopistas de conectividad interregional (como la Ruta 5 y las conexiones hacia la costa de Valparaíso). Esta radiografía espacial demuestra que la infraestructura vial estructurante dicta el acople entre los picos de emisión observados en la serie de tiempo y la dispersión geográfica del contaminante.

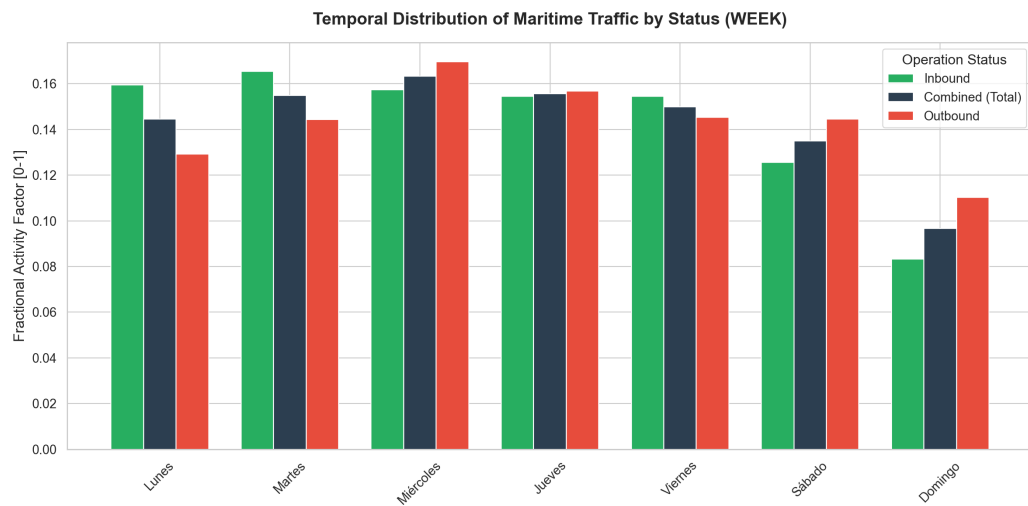
## 4.2. Transporte Marítimo

Continuando con el transporte marítimo, se tiene que la construcción de un inventario dinámico con capacidad de acoplamiento espacio-temporal exige migrar desde las cifras consolidadas anuales hacia escalas de resolución fina. En el caso del transporte marítimo, este proceso también requirió una etapa exhaustiva de minería y depuración de datos primarios de actividad. A partir de los registros de información obtenida vía ley de transparencia, registros e información obtenida mediante el cruce de muchos datos incluyendo la base de datos de DIRECTEMAR y de las bitácoras operacionales de las distintas capitanías de puerto, se estructuró una base de datos unificada con miles de registros individuales de arribo, fondeo, maniobra y zarpe.

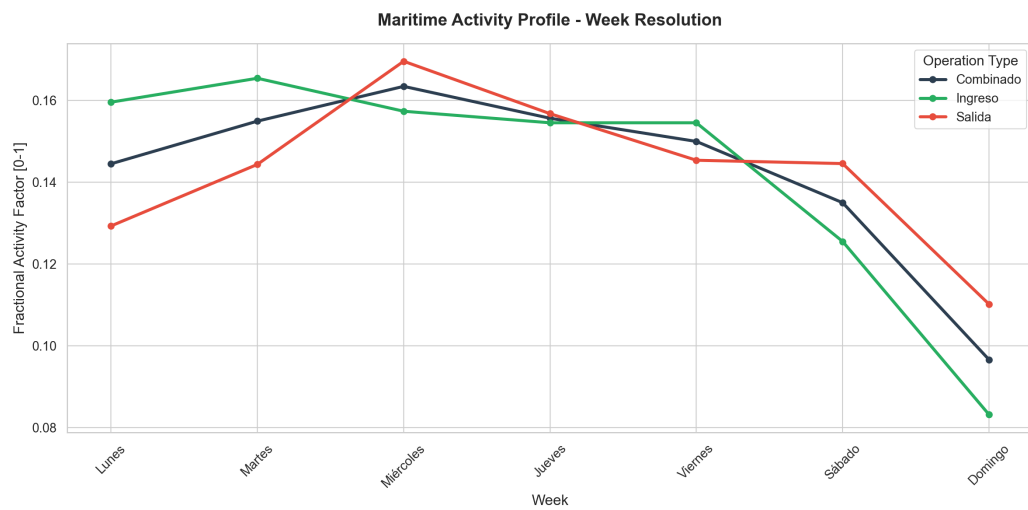
La Figura 4.16 exhibe una captura de pantalla de la arquitectura matricial implementada para el procesamiento de los datos crudos. Mediante rutinas de ordenamiento y cruce relacional, cada evento náutico fue desagregado temporalmente extrayendo variables indexadas como el año, mes numérico, día de la semana y bloques horarios específicos. Asimismo, se incorporó una normalización del sentido del movimiento, discriminando de manera binaria si la embarcación se encontraba en una maniobra de ingreso (*Inbound*) o de salida (*Outbound*). Esta estructuración limpia constituyó la base estadística fundamental para extraer los perfiles adimensionales de actividad.

Antes de analizar las curvas de descarga, es esencial precisar la naturaleza matemática de los perfiles obtenidos. Las fluctuaciones diarias y mensuales se modelaron inicialmente mediante factores de actividad fraccionales (normalizados en un rango de 0 a 1). La modelación se basa en un enfoque estadístico agregativo, esto quiere decir que, por ejemplo, el valor asignado al día lunes no representa una semana en particular, sino el comportamiento promediado y normalizado de la totalidad de los lunes del año en cuestión. Por consiguiente, al momento de desacoplar el inventario, las emisiones absolutas asignadas a un día o mes específico corresponden a la sumatoria integrada de la masa contaminante distribuida uniformemente bajo esa rúbrica a lo largo de todo el ciclo anual.



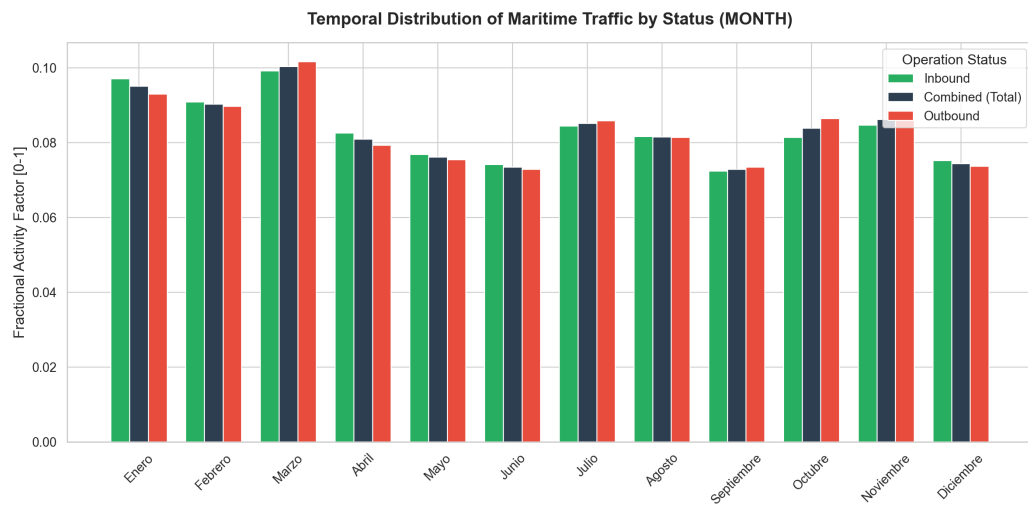


(a) Distribución fraccional por estado operativo

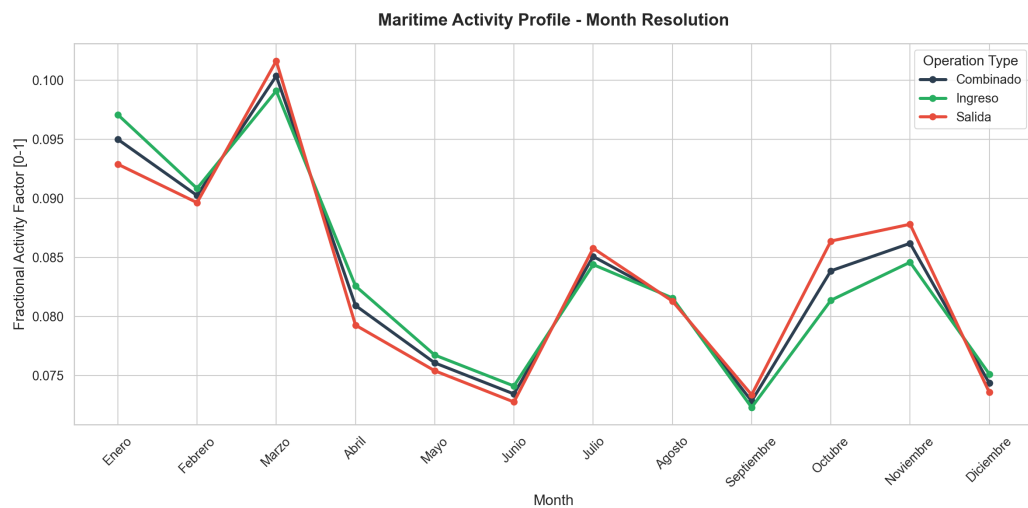


(b) Curvas de tendencia por tipo de operación

Figura 4.17: Perfil temporal de actividad marítima a resolución semanal agregada.



(a) Distribución fraccional mensual por estado operativo



(b) Curvas de tendencia mensual por tipo de operación

Figura 4.18: Perfil temporal de actividad marítima a resolución mensual agregada.

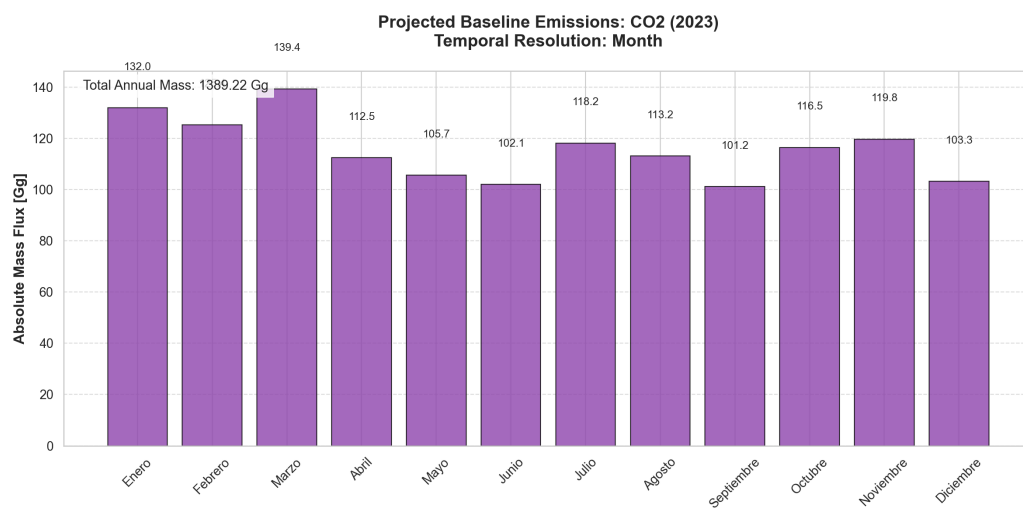
El análisis de la Figura 4.18 devela que marzo se alza de manera indiscutida como el mes con mayor intensidad logística a nivel nacional, superando el factor de 0.10. Este comportamiento responde directamente al peak de la temporada de exportaciones agrícolas del hemisferio sur, lo cual se alinea notablemente con la salida de fruta fresca hacia los mercados del norte, acoplado con la reactivación post-estival del cabotaje industrial y minero. Enero sostiene una demanda equivalente debido al acopio de bienes de consumo previo al cierre estival de febrero, mes que acusa un descenso relativo debido al receso vacacional de las plantas productivas terrestres.

La época invernal introduce notoriamente los valles más severos del inventario. El mes de junio registra la menor actividad del año, patrón que se correlaciona de forma directa con la ocurrencia recurrente de frentes de mal tiempo, marejadas y condiciones de viento adverso en el océano Pacífico central y sur. Estos fenómenos meteorológicos obligan a las capitanías de puerto a decretar el cierre temporal de las bahías y la suspensión de las maniobras de atraque por razones de seguridad náutica. Un segundo valle relativo se constata en septiembre, mes marcado por el feriado extendido de las fiestas patrias nacionales, el cual ralentiza las cadenas logísticas de transporte terrestre que alimentan las losas portuarias.

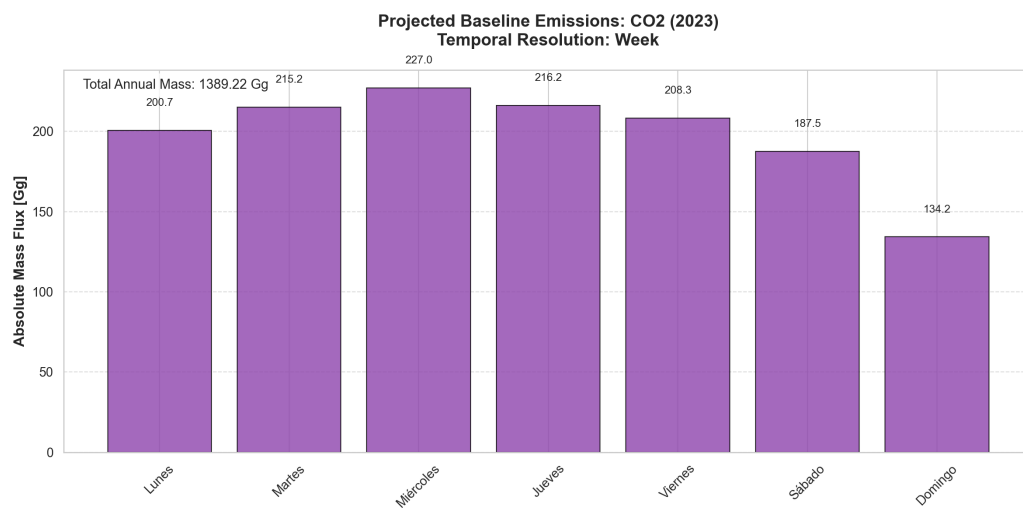
El siguiente paso metodológico consiste en acoplar estos perfiles adimensionales con el inventario de masa anual obtenido y detallado anteriormente, permitiendo proyectar el flujo absoluto de masa contaminante expresado en Gigagramos (Gg). La Figura 4.19 despliega el resultado de este acoplamiento para el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cuyo inventario base totalizado para el año 2023 se fijó en 1,389.22 Gg.

Al evaluar cuantitativamente el  $\text{CO}_2$  (Figura 4.19), la modulación matemática distribuye la masa anual de forma heterogénea. En el desglose mensual (panel a), el peak de marzo inyecta 139.4 Gg de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, mientras que el valle de septiembre restringe la carga a 101.2 Gg. En la escala semanal (panel b), las 1,389.22 toneladas equivalentes acumuladas se traducen en un flujo concentrado los días miércoles, alcanzando las 227.0 Gg por efecto del solapamiento de zarpes, mientras que los domingos la descarga desciende a un mínimo absoluto de 134.2 Gg.

Esta misma rutina de fraccionamiento se aplicó de forma paralela al resto de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero analizados, y se presenta a continuación para los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), una de las sustancias criterio más críticas debido a su rol en los fenómenos de contaminación local urbana. La Figura 4.20 ilustra la distribución temporalizada de este compuesto, partiendo de una masa anual consolidada de 31.28 Gg.

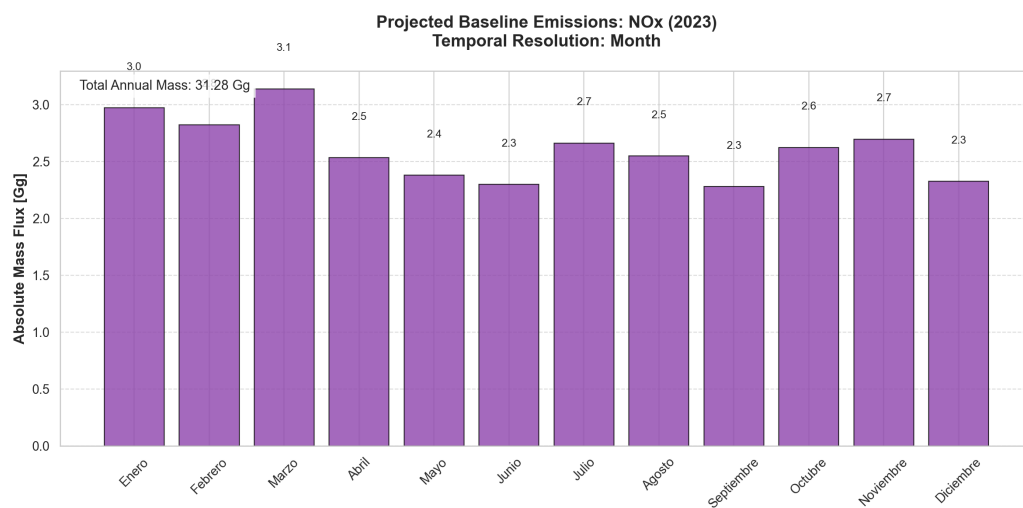


(a) Flujo de masa absoluto de CO<sub>2</sub> por mes

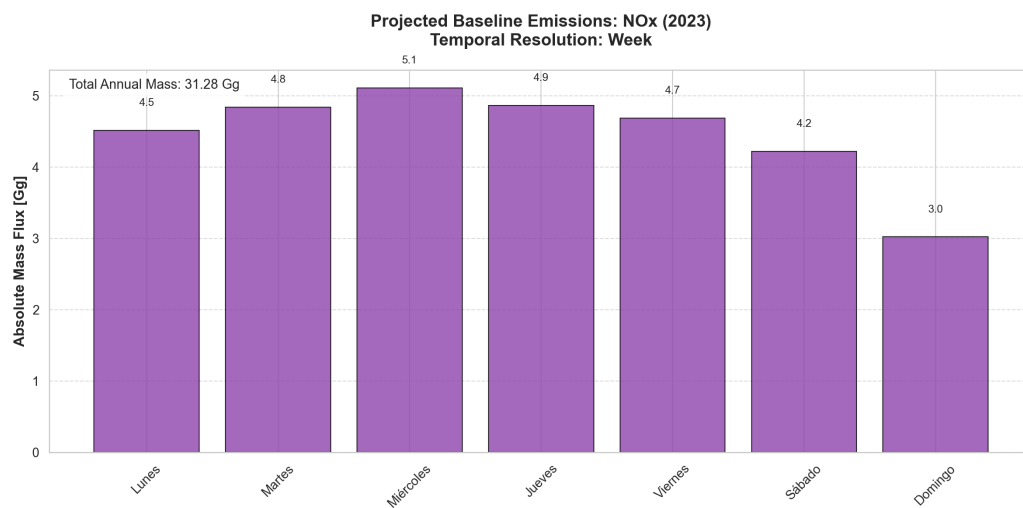


(b) Flujo de masa absoluto de CO<sub>2</sub> por día de la semana

Figura 4.19: Proyección de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Gg) para el año de estudio bajo desagregación temporal.



(a) Flujo de masa absoluto de NO<sub>x</sub> por mes



(b) Flujo de masa absoluto de NO<sub>x</sub> por día de la semana

Figura 4.20: Proyección de las emisiones de NO<sub>x</sub> (Gg) para el año de estudio bajo desagregación temporal.



Como se constata en la Figura 4.20, el mes de marzo absorbe una descarga de 3.1 Gg de  $\text{NO}_x$ , contrapuesto a las 2.3 Gg registradas en junio y septiembre. A nivel de días, el pico de los días miércoles sitúa la masa absoluta en 5.1 Gg, descendiendo los fines de semana hasta tocar las 3.0 Gg los días domingo.

Los resultados numéricos y gráficos obtenidos y presentados hasta ahora constituyen un hito fundamental para los alcances de esta investigación, ya que estas series temporales de flujo absoluto no representan un fin analítico aislado, sino que se consolidan como el insumo dinámico que alimentará los modelos espacio-temporales posteriores y definitivos. Al cruzar estas mallas con las matrices rasterizadas generadas en la sección de desagregación espacial, el software quedará capacitado para generar mapas de calor dinámicos de alta resolución. Esto permitirá evaluar la evolución tridimensional de las plumas de contaminación costera en cualquier coordenada geográfica del litoral y en cualquier hora, mes o semana específica del año, cimentando una base de datos robusta para auditorías ambientales y diseño de planes de descontaminación en zonas saturadas.

Ahora bien, la manipulación de bases de datos de gran volumen dentro de algoritmos de discretización temporal introduce el riesgo sistemático de pérdida de información o errores de redondeo numérico flotante. Cuando las frecuencias de recalada y los tiempos de operación se fraccionan de manera iterativa para cubrir las 8,760 horas de un año cronológico, es indispensable implementar mecanismos estrictos de control de calidad. Con esto en mente y para garantizar la integridad matemática del inventario antes de alimentar las simulaciones espacio-temporales avanzadas, se programaron un módulos automatizados de auditoría de conservación de masa. Básicamente lo que hacen estos modelos implementados es que contrastan de forma estricta la masa anual de entrada (calculada de forma estática) contra la sumatoria integrada de las masas distribuidas en todas las celdas y pasos temporales. La Tabla 4.3 transcribe el reporte analítico de control generado por este entorno de validación para el año de estudio 2023.

Los resultados del balance confirman la estabilidad del código. Para vectores de alta masa como el  $\text{CO}_2$ , la diferencia neta es idéntica a cero, mientras que para compuestos de menor escala molecular como el  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  o el carbono negro (BC), los desvíos matemáticos se sitúan en el orden de  $10^{-15}$  a  $10^{-18}$  Gg. Estas discrepancias son infinitesimales y corresponden exclusivamente al límite de precisión por truncamiento de la arquitectura computacional utilizada, validando el proceso de asignación cronológica sin fugas de información.

Una vez demostrada la consistencia interna del modelo a nivel global, se evaluó la capacidad del algoritmo para adaptarse de manera flexible a las particularidades

Tabla 4.3: Reporte de auditoría y balance de masa para la validación del algoritmo de desagregación temporal (Periodo 2023).

| Contaminante      | Target_Annual_Mass | Temporally_Allocated_Mass | Delta_Error               | Status   |
|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| CO <sub>2</sub>   | 1389.218738        | 1389.218738               | 0                         | APPROVED |
| NO <sub>x</sub>   | 31.27889636        | 31.27889636               | $3,55271 \times 10^{-15}$ | APPROVED |
| SO <sub>2</sub>   | 3.596725937        | 3.596725937               | $4,44089 \times 10^{-16}$ | APPROVED |
| PM <sub>10</sub>  | 1.32415135         | 1.32415135                | 0                         | APPROVED |
| PM <sub>2.5</sub> | 1.218559833        | 1.218559833               | 0                         | APPROVED |
| CO                | 1389.218738        | 1389.218738               | 0                         | APPROVED |
| NM <sub>VOC</sub> | 1.235294393        | 1.235294393               | 0                         | APPROVED |
| BC                | 0.040897066        | 0.040897066               | $6,93889 \times 10^{-18}$ | APPROVED |
| NH <sub>3</sub>   | 0.050831607        | 0.050831607               | $6,93889 \times 10^{-18}$ | APPROVED |

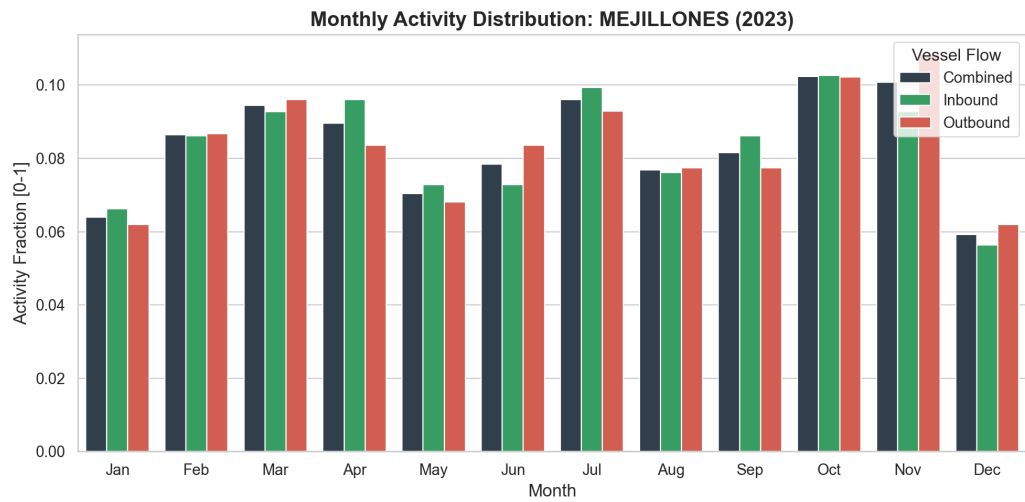
logísticas de puertos específicos. La arquitectura modular del sistema permite aislar y extraer los perfiles temporales fraccionales para cualquier puerto del país, para distintas escalas temporales e independientemente de su ubicación geográfica o especialización comercial.

A modo de demostración de esta versatilidad, las Figuras 4.21 y 4.22 contrastan los perfiles de distribución mensual fraccional para dos de los polos portuarios más importantes de las zonas norte y centro del país, respectivamente, utilizando diagramas de barras e histogramas de línea complementarios.

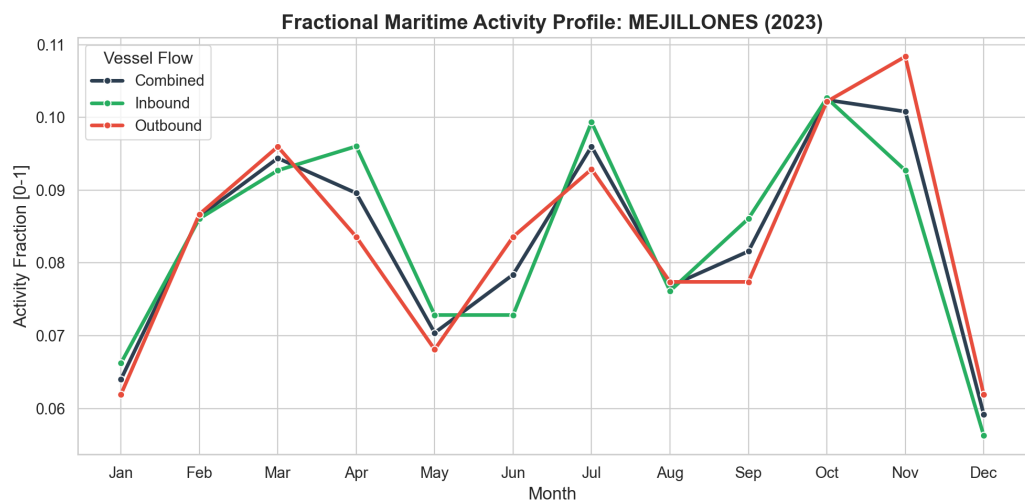
Al analizar de cerca el comportamiento de la Bahía de Mejillones (Figura 4.21), se hace patente el peso de la actividad minero-industrial del norte chileno. La distribución fraccional muestra un repunte significativo durante octubre y noviembre, lo cual está directamente impulsado por los tráficos de ingreso (*Inbound*) y salida (*Outbound*). El invierno acusa una baja moderada en junio, vinculada a las restricciones operativas por condiciones oceanográficas desfavorables en la costa abierta de la segunda región.

Por otra parte, el Puerto de San Antonio exhibe una dinámica algo distinta. Como se detalla en las curvas y barras de la Figura 4.22, la actividad mensual es sustancialmente más homogénea a lo largo del año, lo que delata su condición de puerto multipropósito principal de abastecimiento para la zona central del país.

El punto de mayor inflexión operativa en San Antonio se consolida en el mes de marzo, donde los flujos de salida (*Outbound*) alcanzan su valor máximo en la serie temporal. Este comportamiento refleja claramente la salida masiva de productos agrícolas estacionales hacia los mercados internacionales. Febrero, por su parte, marca

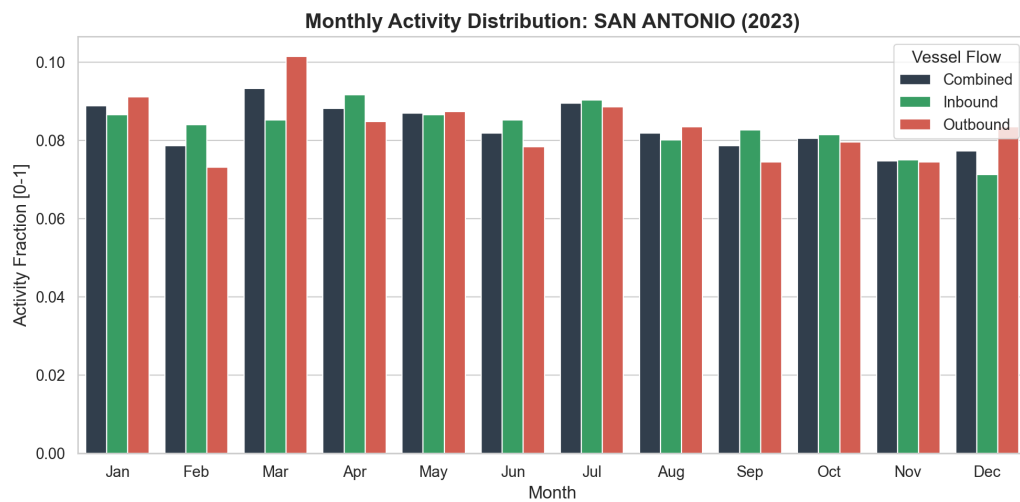


(a) Histograma de bloques estacionales

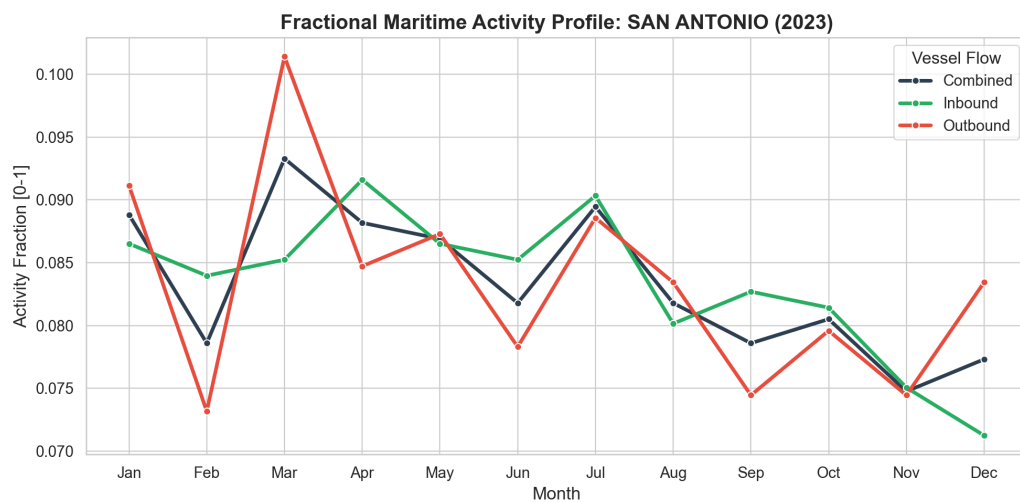


(b) Curva continua de tendencia fraccional

Figura 4.21: Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de Mejillones (2023) discriminado por flujo de naves.



(a) Histograma de bloques estacionales



(b) Curva continua de tendencia fraccional

Figura 4.22: Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de San Antonio (2023) discriminado por flujo de naves.

el punto de contracción más bajo debido al cese temporal de la actividad industrial interna durante el periodo de vacaciones estacionales.

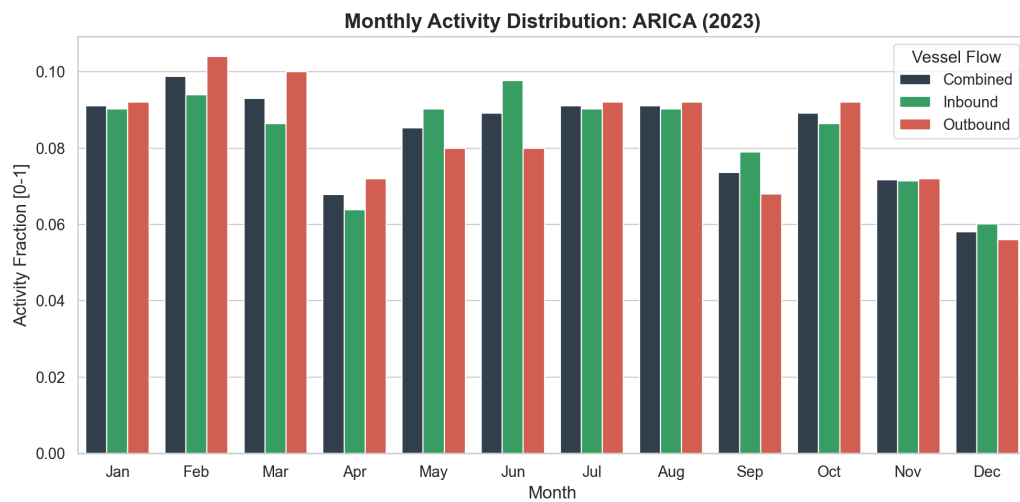
Para complementar este análisis regional y demostrar el alcance del modelo hacia las fronteras del extremo del país, las Figuras 4.23 y 4.24 despliegan las salidas temporales del algoritmo aplicadas a los terminales de Arica e Iquique.

En el Puerto de Arica (Figura 4.23), el comportamiento matemático revela un acoplamiento directo con las lógicas de tránsito internacional que rigen a dicho terminal. Se observa principalmente el pico binario de actividad en febrero y marzo, tramo donde los flujos de salida se elevan marcadamente por sobre los de ingreso. Junio exhibe una recuperación en las operaciones de entrada, estabilizando la curva combinada antes de enfrentar la baja invernal tardía del segundo semestre.

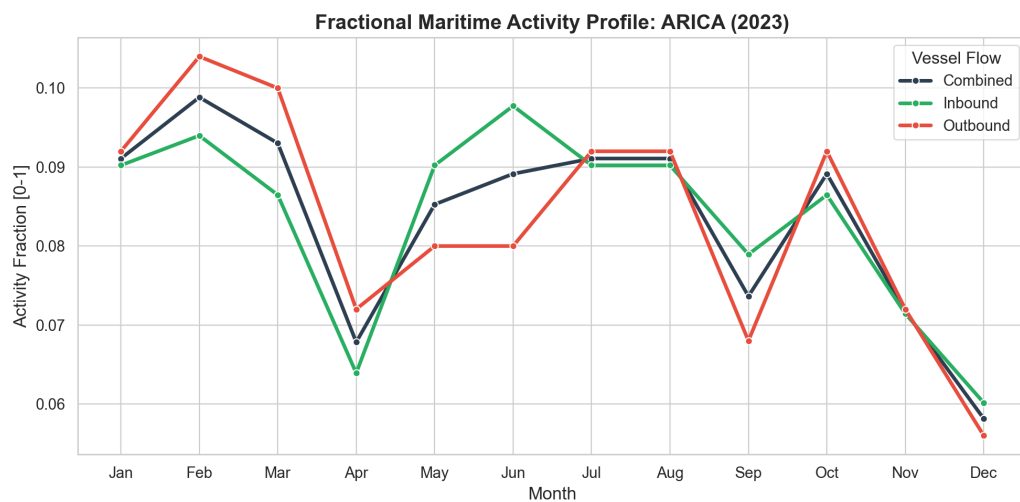
Por último, el nodo de Iquique, ilustrado en la Figura 4.24, expone una configuración temporal dominada de forma nítida por las actividades logísticas de la Zona Franca y el transporte marítimo de apoyo comercial asociado.

El perfil de la primera región (Figura 4.24) muestra un crecimiento exponencial durante mayo, donde las operaciones de entrada (*Inbound*) rozan el límite superior de 0.10. Este comportamiento responde al reabastecimiento comercial pre-invernal de mercancías. La curva experimenta una segunda ventana de alta intensidad en los meses de octubre y noviembre, reflejando el incremento de recaladas de buques, principalmente portacontenedores, que preparan las campañas comerciales del cierre de año, mientras que los meses invernales de junio y julio registran valles pronunciados.

La capacidad de replicar estas firmas operativas locales y según distintas temporalidades para distintos terminales valida la robustez metodológica del modelo desarrollado, ya que el algoritmo no se limita a aplicar generalizaciones abstractas a nivel nacional, sino que lee, depura e interpreta las dinámicas logísticas específicas de cada puerto a partir de los datos crudos de actividad alimentados mediante archivos 'csv' y distintos archivos excel. Estos perfiles locales de los puertos de Mejillones, San Antonio, Arica e Iquique constituyen parte de los bloques constructivos con los que se alimentarán las rutinas espacio-temporales definitivas, garantizando que la posterior generación de mapas de calor dinámicos responda de manera matemática a la sincronía real del tráfico naviero en las costas chilenas.

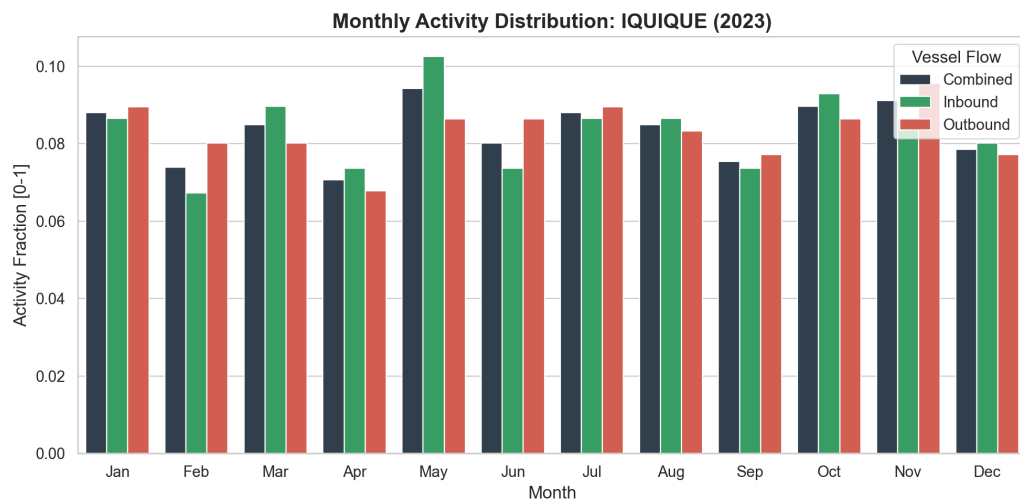


(a) Histograma de bloques estacionales

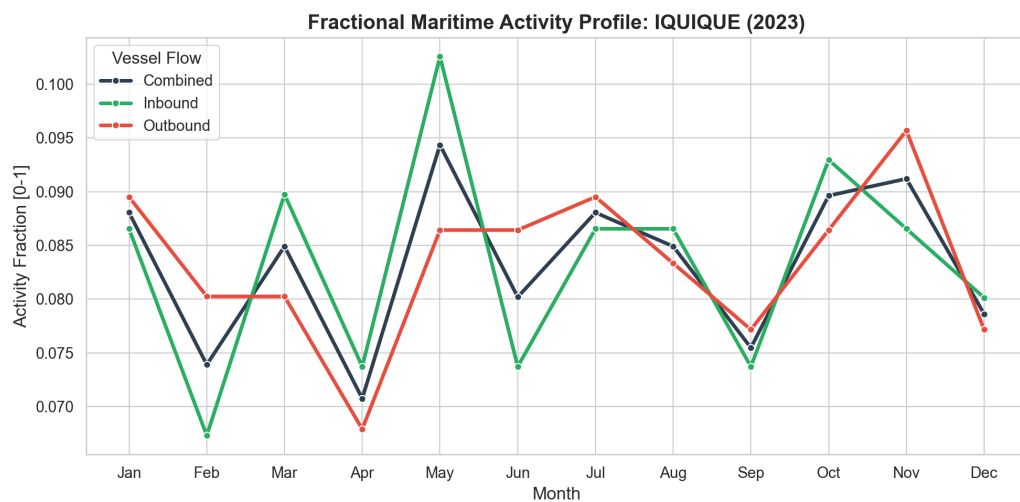


(b) Curva continua de tendencia fraccional

Figura 4.23: Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de Arica (2023) discriminado por flujo de naves.



(a) Histograma de bloques estacionales



(b) Curva continua de tendencia fraccional

Figura 4.24: Perfil temporal de la fracción de actividad mensual en el Puerto de Iquique (2023) discriminado por flujo de naves.

### 4.2.1. Análisis Comparativo Interportuario y Validación Multifactorial

El siguiente paso en la modelación cronológica de la contaminación naviera consiste en la sincronización cruzada de las curvas locales. Al integrar los factores de marcha adimensionales en una misma matriz comparativa, el sistema permite fiscalizar el comportamiento relativo y simultáneo de los principales nodos de la red costera como se presentó anteriormente. Ahora la Figura 4.25 despliega las curvas de tendencia mensual combinada para los terminales de Arica, Iquique, Mejillones, San Antonio y Valparaíso, revelando la existencia de regímenes operativos asincrónicos que obedecen a las distintas vocaciones económicas de cada territorio.

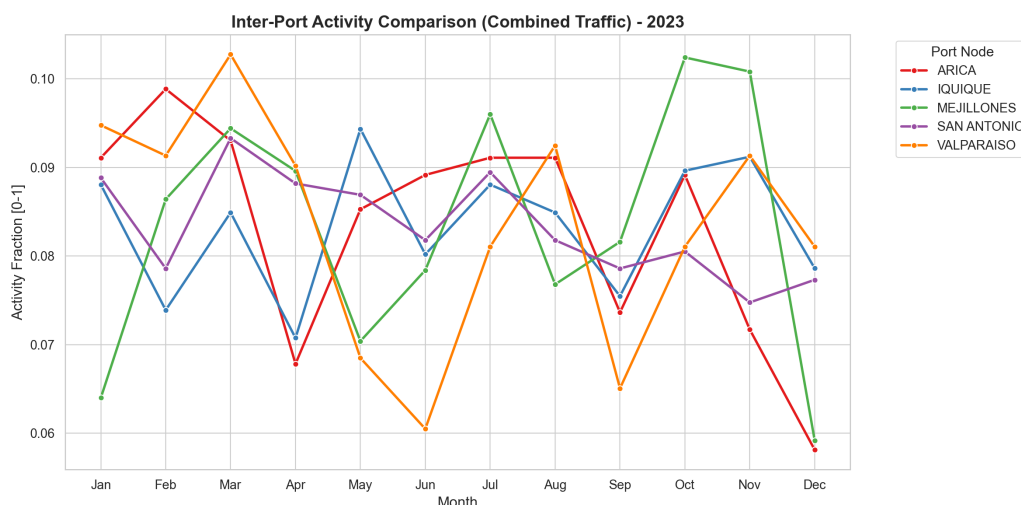


Figura 4.25: Comparación interportuaria de los perfiles temporales de actividad mensual (tránsito combinado) durante el periodo 2023.

El análisis de las curvas (Figura 4.25) devela correlaciones estacionales cruzadas de gran interés analítico. Los puertos de la zona central, Valparaíso y San Antonio, muestran un acoplamiento casi simétrico durante el primer trimestre, alcanzando su peak en marzo debido al esfuerzo logístico que demanda la exportación acuícola y frutícola de los valles interiores. No obstante, hacia el segundo semestre sus caminos divergen, y se logra apreciar que Valparaíso experimenta una contracción severa en junio y un desplome absoluto en septiembre, mientras que San Antonio sostiene un régimen operativo más estable debido a su alta diversificación en la recepción de carga general y graneles limpios.



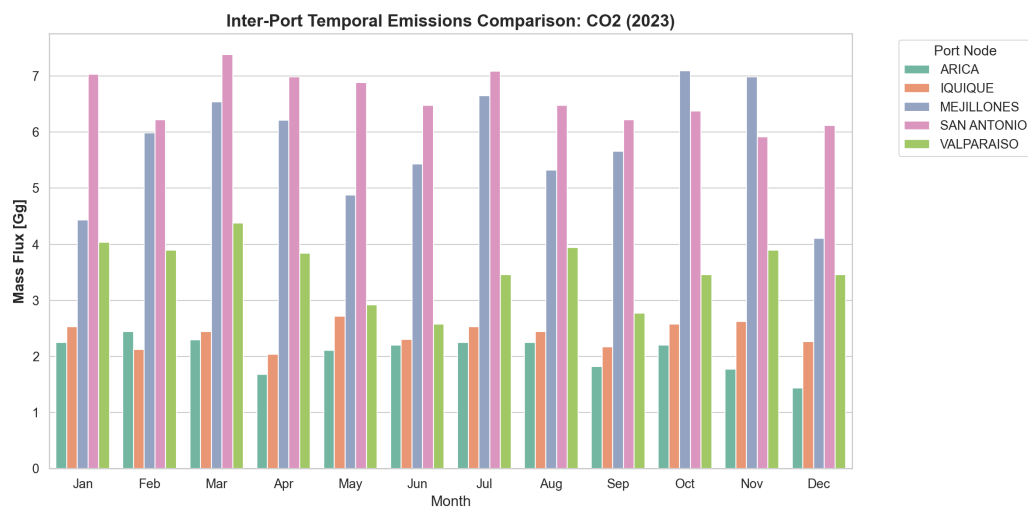
En el extremo norte, la dinámica cambia por completo, y se observa que Mejillones exhibe un rezago estacional respecto al centro del país, deprimiendo sus operaciones en el verano e invierno temprano para disparar sus factores de marcha por sobre el valor de 0.10 en los meses de octubre y noviembre. Este desfase responde a los ciclos estipulados en los contratos internacionales de suministro minero y las ventanas de despacho físico de concentrados de cobre. Por su parte, Arica e Iquique muestran fluctuaciones de alta frecuencia que reflejan su dependencia de los regímenes aduaneros terrestres y los flujos transfronterizos indexados a tratados comerciales internacionales, registrando valles profundos en abril y diciembre.

Más allá de la distribución relativa de la actividad, la robustez del modelo desarrollado radica en su capacidad para traducir de forma automática estos perfiles adimensionales en flujos de masa absolutos expresados en Gigagramos (Gg), diferenciando de forma simultánea el comportamiento de cada contaminante de interés. Las Figuras 4.26 y 4.27 exponen el post-procesamiento comparativo interportuario de masa mensual para gases de efecto invernadero y contaminantes criterio.

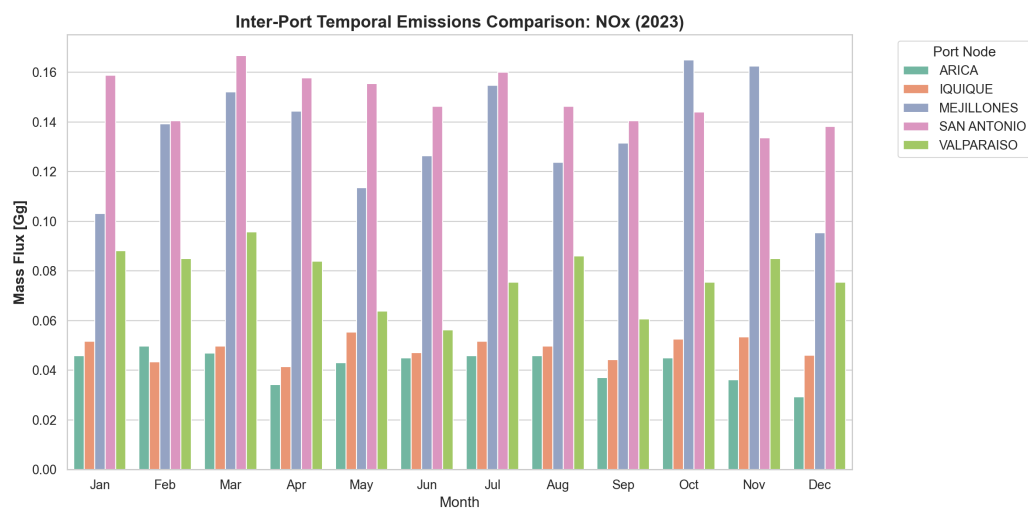
Al evaluar las emisiones absolutas de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (Figura 4.26), el modelo demuestra que la magnitud de la descarga atmosférica no depende exclusivamente del factor de actividad fraccional, sino del tonelaje y la escala de los buques mercantes asociados a cada puerto. San Antonio y Mejillones dominan de manera absoluta el volumen del inventario nacional durante todos los meses del año. En marzo, San Antonio registra una inyección superior a los 7.0 Gg de CO<sub>2</sub> y rebasando los 0.16 Gg de NO<sub>x</sub>, consolidándose como el principal *hotspot* superficial del litoral.

Mejillones iguala e incluso supera transitoriamente a San Antonio durante los meses de octubre y noviembre, rozando los 7.1 Gg de CO<sub>2</sub> y estableciendo el máximo anual de NO<sub>x</sub> con más de 0.16 Gg. Este fenómeno se fundamenta en que, si bien Mejillones registra menos recaladas totales que el nodo de la quinta región, las naves que operan en sus terminales corresponden mayoritariamente a buques graneleros de gran calado (*Capesize* y *Panamax*) y quimiqueros pesados, cuyos motores principales y auxiliares operan a potencias nominales severamente más altas, disparando el balance de masa estequiométrico por hora de estadía.

Esta misma capacidad de discriminación en alta resolución temporal se extiende hacia los contaminantes criterio minoritarios y precursores de aerosoles secundarios, los cuales revisten la mayor importancia para las evaluaciones de salud pública en las comunas costeras. La Figura 4.27 detalla las salidas del modelo aplicadas al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y carbono negro (BC).

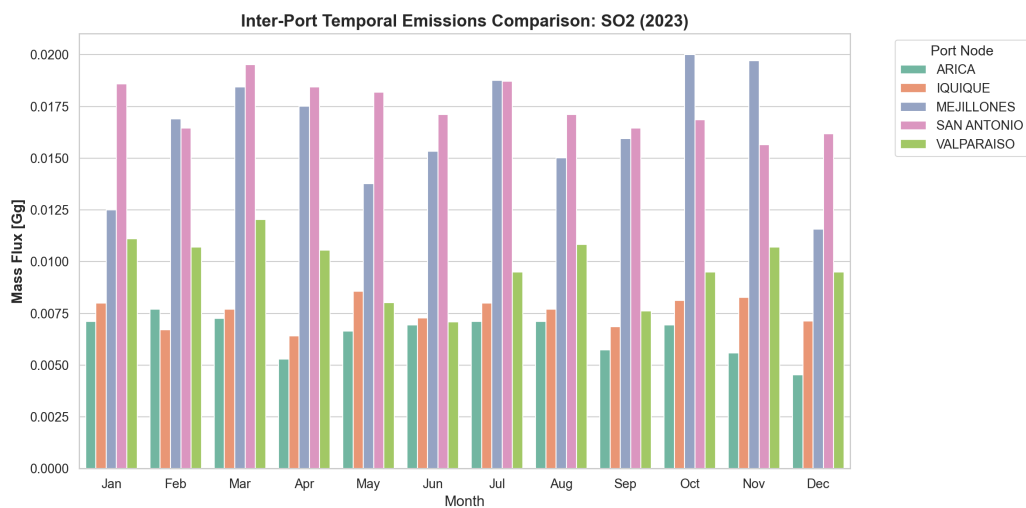


(a) Flujo de masa mensual de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

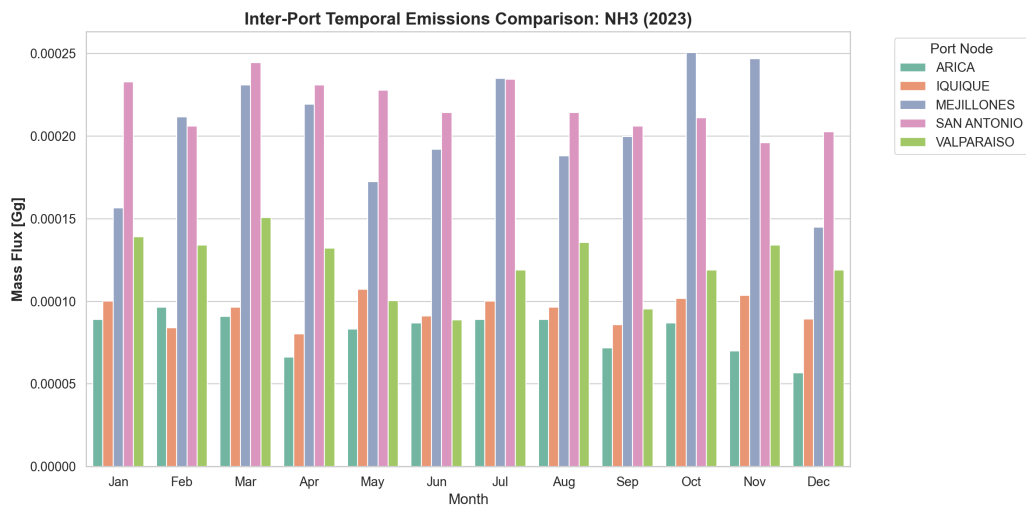


(b) Flujo de masa mensual de Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )

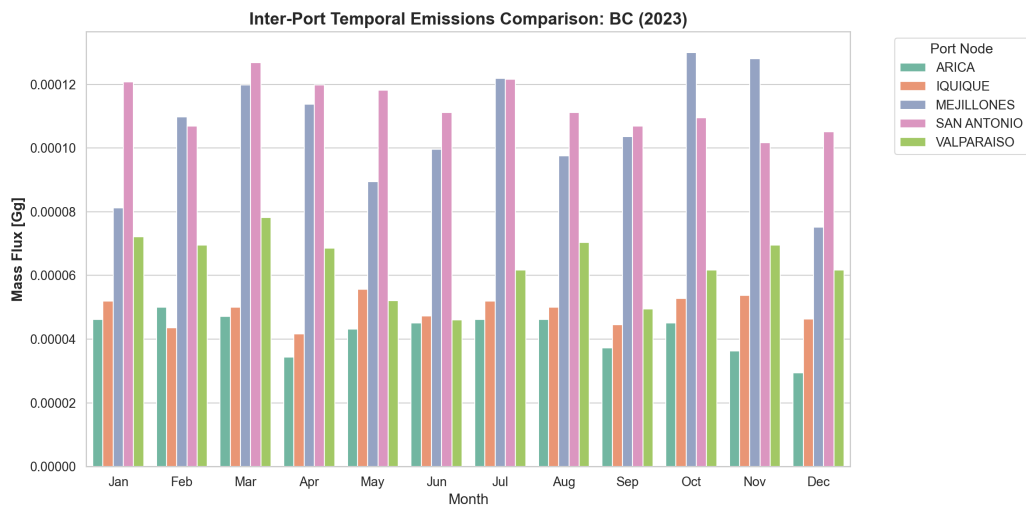
Figura 4.26: Modelación comparativa interportuaria del flujo de masa mensual absoluto para  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ .



(a) Flujo de masa mensual de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)



(b) Flujo de masa mensual de Amoníaco (NH<sub>3</sub>)



(c) Flujo de masa mensual de Carbono Negro (BC)

Figura 4.27: Modelación comparativa interportuaria del flujo de masa mensual absoluto para compuestos criterio (SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y BC).

El desglose de estos compuestos (Figura 4.27) devela la sensibilidad química del algoritmo. El comportamiento del  $\text{SO}_2$  (panel a) calca la hegemonía de San Antonio y Mejillones, fijando tasas de emisión que alcanzan los 0.020 Gg mensuales por puerto, lo que implica una carga continua de óxidos de azufre en fase gaseosa propensa a experimentar oxidación secundaria en la capa marina. Por su parte, los perfiles de  $\text{NH}_3$  (panel b) y BC (panel c), aunque se expresan en órdenes de magnitud marcadamente menores ( $\sim 10^{-4}$  Gg), son calculados con absoluta estabilidad numérica por el script desarrollado, capturando con fidelidad los picos de emisión fraccionados en las ventanas logísticas de primavera y otoño.

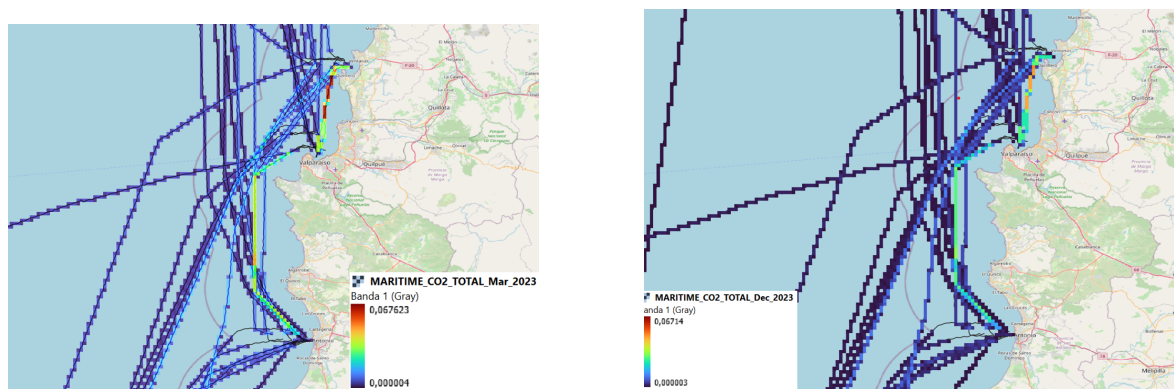
La obtención y validación de esta densa arquitectura de matrices comparativas interportuarias, multifactoriales y multiespecie, constituye un hito fundamental y definitivo para los módulos analíticos de este estudio. Con este nivel de resolución cronológica verificado y los balances de masa plenamente aprobados por el módulo de auditoría computacional, el modelo queda en condiciones óptimas para enfrentar la etapa de integración final, ya que ahora lo que sigue es que estas matrices de flujo temporal continuo se acoplarán geométricamente con las capas vectoriales estructuradas anteriormente, fundiendo la dimensión cronológica con la cuadrícula espacial rasterizada para dar origen al modelo espacio-temporal definitivo de alta resolución.

#### **4.2.2. Integración Espacio-Temporal y Mapas de Calor Dinámicos**

La desagregación espacio-temporal de esta investigación respecto al sector marítimo alcanza su punto cúlmine al fusionar las matrices rasterizadas estáticas con los vectores fraccionales de tiempo. Este acoplamiento genera un modelo espacio-temporal de alta resolución que no solo ubica las emisiones en el plano bidimensional, sino que modela su respiración dinámica a lo largo de las estaciones del año. Para ilustrar la robustez, sensibilidad y capacidad de discriminación del código programado, se han extraído simulaciones mensuales específicas que permiten visualizar el comportamiento de la huella de carbono bajo distintos meses y para distintos puertos de Chile.

La Figura 4.28 expone el mapa de calor dinámico del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para la macrozona central, contrastando diametralmente el comportamiento de la flota durante el mes de marzo frente a la actividad de diciembre.

Al someter ambos mapas a una inspección visual bajo una misma escala de gradientes de color, la disparidad es notable. En el panel (a), correspondiente a marzo, la cuadrícula costera arde en tonalidades rojas y amarillas de altísima saturación, exten-



(a) Dispersión espacial de CO<sub>2</sub> - Marzo 2023    (b) Dispersión espacial de CO<sub>2</sub> - Diciembre 2023

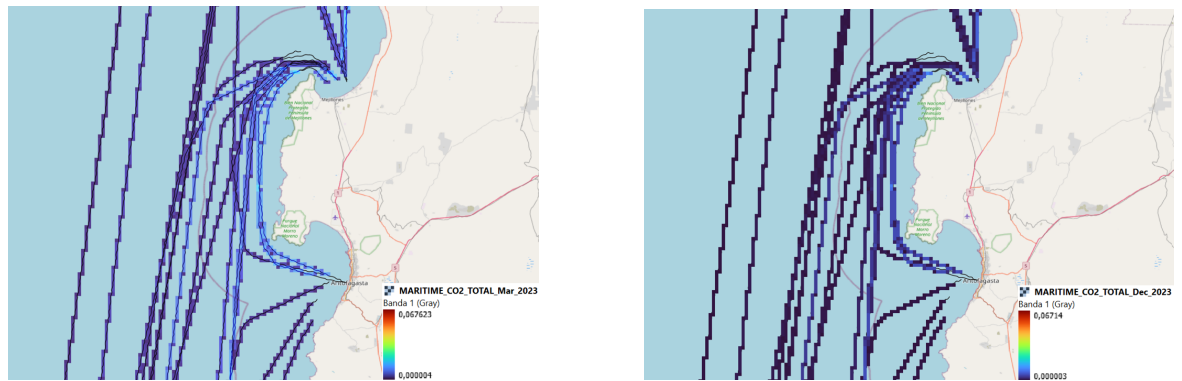
Figura 4.28: Modelación espacio-temporal comparativa de las emisiones marítimas de alta resolución en la zona central de Chile.

diéndose las plumas de emisión densas mucho más allá de los límites físicos de los rompeolas. Esta explosión corrobora espacialmente los hallazgos numéricos obtenidos en los perfiles temporales previos, donde marzo se consolidó como el peak absoluto del año debido a la convergencia de la máxima demanda de exportación frutícola y el reinicio de las cadenas logísticas industriales post-verano. A modo de contraste, se presenta la simulación realizada para el mes de diciembre (panel b), en donde esta exhibe una drástica contracción en la intensidad de las celdas. A pesar de que la escala de colores empleada es la misma, la paleta dominante retrocede hacia matices azules y verdes fríos, limitando las zonas de alta densidad térmica a escasos píxeles aislados en el núcleo mismo de los atracaderos de San Antonio y Valparaíso.

Resulta particularmente llamativa la densa traza de saturación térmica que el algoritmo asigna a la ruta de conexión directa entre las bahías de Valparaíso y Quintero durante el periodo de alta demanda. Como se aprecia en la captura de marzo, esta franja de tránsito de cabotaje exhibe una línea de píxeles rojos y amarillos casi ininterrumpida, un nivel de concentración de gases notable que el modelo logra capturar. Este fenómeno responde a una particularidad logística crítica de la zona central, ya que Quintero opera como el hub energético primario del país (hidrocarburos, GNL y carbón), mientras que Valparaíso concentra carga general. Dada la altísima ocupación de los sitios de amarre en Ventanas y Quintero, los buques tanque y quimiqueros, entre otros, suelen utilizar la bahía de Valparaíso y sus zonas de fondeo adyacentes como áreas de espera. El tránsito posterior de estas pesadas embarcaciones a lo largo de esa corta distancia se realiza a bajas velocidades, obligando a los motores de propulsión principal a operar fuera de su

curva de eficiencia termodinámica óptima, lo que dispara exponencialmente el factor de emisión de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido y satura las celdas de la grilla que unen ambos recintos.

Este patrón de variabilidad cronológica y espacial tiene su réplica exacta en los terminales mineros del norte del país. La Figura 4.29 traslada el enfoque comparativo hacia la Región de Antofagasta, modelando la cuenca de Mejillones bajo los mismos parámetros temporales.



(a) Dispersión espacial de CO<sub>2</sub> - Marzo 2023    (b) Dispersión espacial de CO<sub>2</sub> - Diciembre 2023

Figura 4.29: Modelación espacio-temporal comparativa del flujo naviero en el polo portuario de Mejillones.

Nuevamente, el algoritmo logra discriminar la temporalidad de la presión atmosférica local. Las rutas de aproximación de graneleros tipo Capesize hacia la península de Mejillones destellan con mayor notoriedad durante el trimestre otoñal (panel a), trazando pasillos celestes y cianes sobre el océano abierto que luego colapsan en píxeles cálidos al entrar al régimen de maniobra portuaria. Diciembre, en consistencia con las bases de datos de DIRECTEMAR ingresadas al código, impone una matriz mucho más fría y menos densa, reflejando una descompresión transitoria de la actividad naviera industrial hacia fines del año.

Con la exitosa generación de estos mapas predictivos de alta resolución espacio-temporal, se da por finalizada y validada esta etapa del transporte marítimo chileno. La estructura de código aquí desarrollada trasciende el mero cálculo estático de un inventario anual de gases, ya que más bien constituye en la práctica un motor de simulación paramétrico versátil. Al estar sustentado en archivos relacionales estandarizados (GeoPackage, NetCDF y TIFF) y balances de masa matemáticamente comprobados, este entorno de modelación y programas desarrollados quedan a entera disposición para

investigadores, tomadores de decisión y/o cualquier persona interesada en esta modelación, ya que estos modelos generados y resultados obtenidos se pueden usar para aislar episodios críticos de contaminación, proyectar escenarios futuros y nutrir con datos de alta fidelidad y precisión a los complejos softwares de dispersión fotoquímica tridimensional que utilizan las agencias de fiscalización ambiental.

Por otro lado, se presenta la Figura 4.30, la cual expone el perfil de carga horaria nacional junto con la curva de asignación acumulada para las emisiones de CO<sub>2</sub> de origen marítimo.

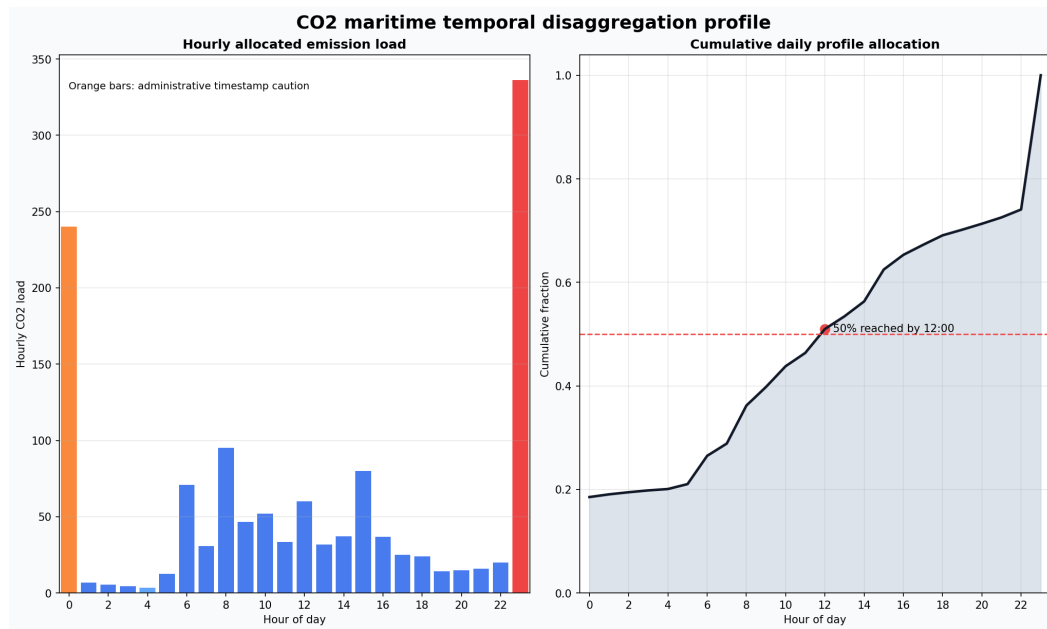


Figura 4.30: Perfil de desagregación temporal de emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector marítimo. Se identifican anomalías en los extremos del ciclo asociadas a criterios de asignación administrativa.

El perfil de la Figura 4.30 revela una acumulación atípica de la carga en las horas 00:00 y 23:00. Este comportamiento constituye un artefacto común en inventarios de emisiones marítimas, derivado de la asignación administrativa de marcas de tiempo cuando los buques registran recaladas o zarpes informados sin precisar el minuto exacto del tránsito, concentrando los eventos en las fronteras del día operacional. Excluyendo estos dos umbrales, la actividad real muestra incrementos diurnos con picos definidos a las 08:00 y las 15:00 horas, vinculados directamente a los turnos de operación portuaria estándar. La curva acumulada expone un crecimiento relativamente lineal en el periodo intermedio, alcanzando el 50 % de la fracción diaria hacia las 12:00 horas. Para com-

prender la traducción geográfica de estas fluctuaciones a lo largo del litoral, la Figura 4.31 ilustra la intensidad del índice de emisión en cuatro ventanas horarias específicas de la costa chilena.

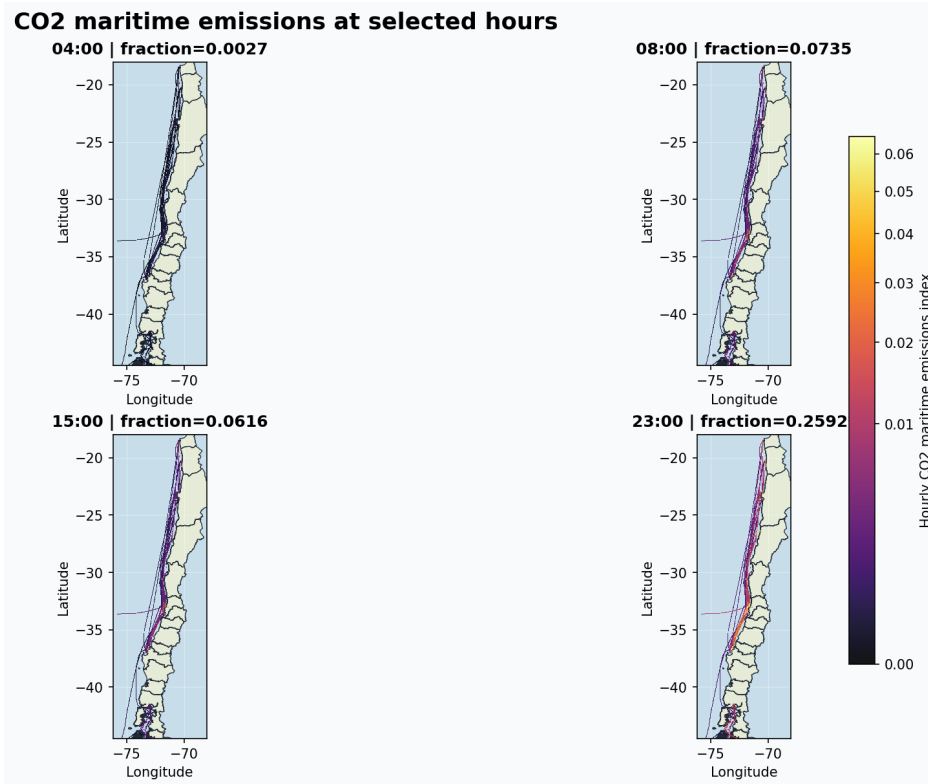


Figura 4.31: Distribución espacial del índice de emisiones marítimas de CO<sub>2</sub> en la costa nacional para horarios seleccionados.

La representación de la Figura 4.31 evidencia que los flujos de emisión se concentran en corredores longitudinales paralelos a la línea de costa, interconectando los principales complejos portuarios del país. A las 04:00 horas, la fracción de emisión efectiva es casi nula (0,0027), reflejando el estado de baja actividad en alta mar durante la madrugada. No obstante, a medida que avanza la jornada (08:00 y 15:00 horas), las rutas de navegación incrementan su señal con fracciones de 0,0735 y 0,0616, respectivamente. El máximo cartográfico se observa a las 23:00 horas (fraction = 0,2592), donde la saturación de las líneas de navegación en la zona central y sur concuerda con el efecto de asignación administrativa discutido en el análisis temporal, concentrando espacialmente la representación de las trayectorias al cierre de la jornada del inventario.



### 4.3. Transporte Aéreo

Continuando ahora con el análisis temporal para las emisiones de transporte aéreo, y recordando que el análisis de las emisiones atmosféricas requiere una comprensión profunda de su dinámica en el tiempo, ya que las fuentes móviles presentan patrones de actividad altamente variables, es que se presentan estos resultados para analizar en profundidad el comportamiento temporal de las emisiones del sector aeronáutico chileno. Esta desagregación temporal se aborda desde una perspectiva histórica de largo plazo hasta el nivel de ciclos semanales y horarios. Para comprender a cabalidad la dinámica operativa y la demanda del sistema, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del comportamiento temporal del tráfico aéreo. Este estudio abarca distintas escalas temporales, permitiendo identificar patrones estacionales, variaciones semanales y el ciclo diario de operaciones. Esta caracterización es fundamental para la correcta planificación de recursos y la evaluación de la capacidad instalada. En primera instancia, la evaluación de la actividad a lo largo del año revela una clara tendencia vinculada a los periodos estivales. Como se ilustra en la Figura 4.32, el volumen de operaciones alcanza su punto máximo durante los meses de enero y diciembre, superando el 9 % del total anual en ambos casos. Por el contrario, se observa una disminución sostenida hacia mediados de año, registrando el nivel más bajo durante el mes de junio, con una participación cercana al 7 %.

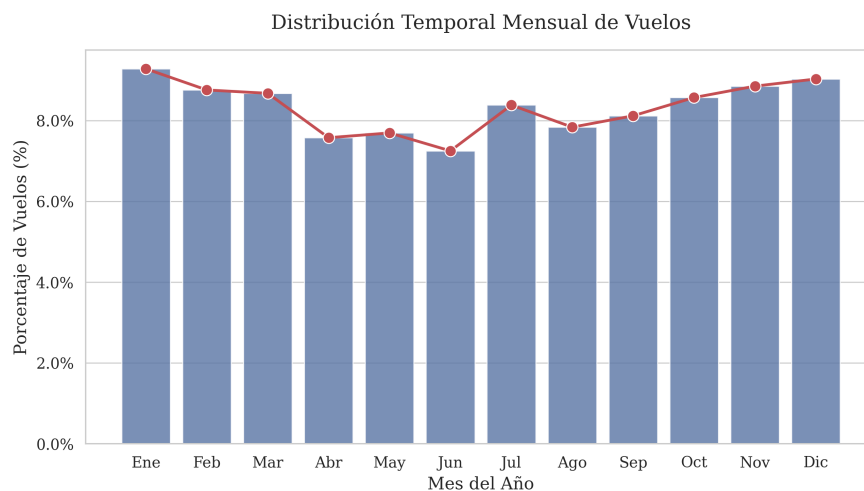


Figura 4.32: Distribución temporal mensual de vuelos. Se aprecia el porcentaje de operaciones por mes respecto al total anual, destacando el incremento durante la temporada estival.

Esta variabilidad mensual se traduce directamente en el comportamiento agregado por estaciones. La Figura 4.33 consolida esta información, demostrando que la época de verano concentra la mayor proporción del tráfico con un 27,1 %, seguida por la primavera con un 25,5 %. Las temporadas de otoño e invierno presentan las menores proporciones, consolidando un 23,9 % y un 23,5 % respectivamente. Esta brecha estacional confirma la influencia de factores climáticos y periodos vacacionales en la demanda del servicio.

Distribución Estacional de Vuelos

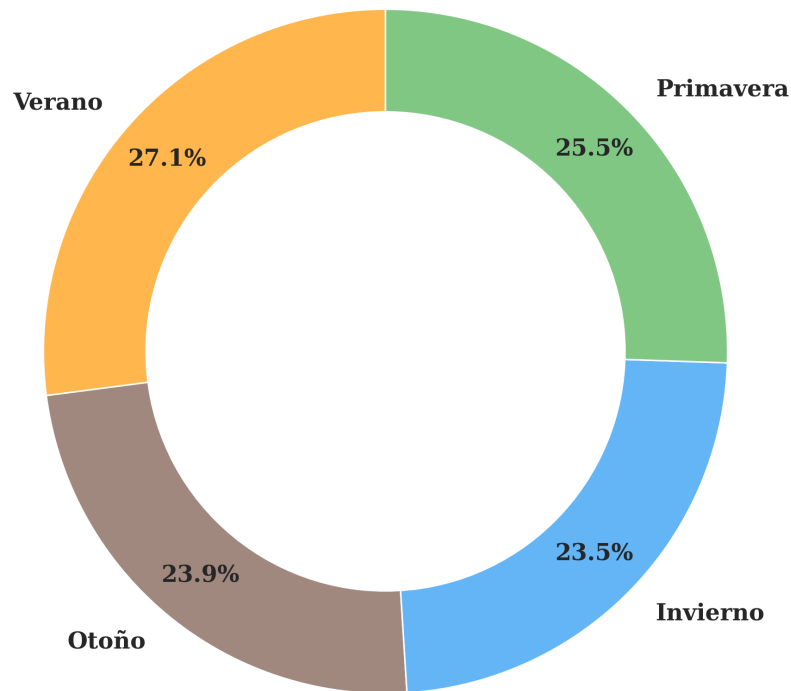


Figura 4.33: Distribución estacional de vuelos. Proporción del tráfico aéreo segregado por las cuatro estaciones del año.

Al desglosar la información a una escala de mayor resolución, la evolución semanal a lo largo de las 52 semanas del año (Figura 4.34) ratifica la estabilidad relativa del sistema durante gran parte del periodo operativo, fluctuando mayoritariamente entre el 1,5 % y el 2,0 % semanal como se puede observar en la figura respectiva.

Por otro lado, el análisis de la distribución según el día de la semana (Figura 4.35)

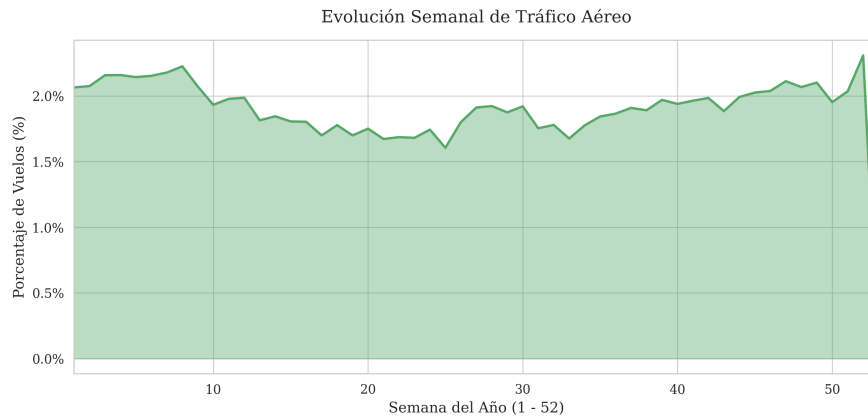


Figura 4.34: Evolución semanal del tráfico aéreo. Variación porcentual del volumen de vuelos a lo largo de las semanas del año.

expone un patrón fuertemente marcado por la actividad en días hábiles. De lunes a viernes, la demanda se mantiene por encima del 14 %, alcanzando un pico máximo los días jueves (aproximadamente 15,6 %). Durante el fin de semana, la actividad decrece de forma considerable, registrando el nivel mínimo de operaciones los días sábados, con un valor cercano al 11 %. Este comportamiento sugiere que una proporción significativa de los vuelos está asociada a dinámicas laborales o corporativas más que exclusivamente turísticas.

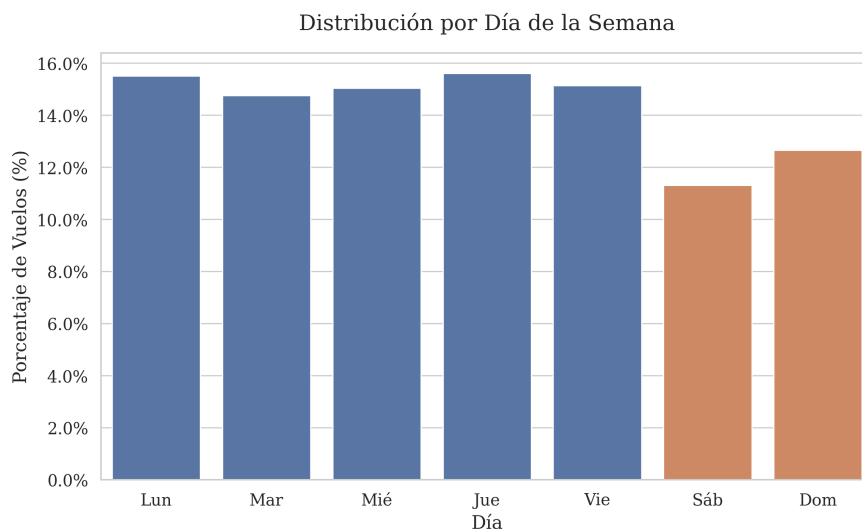


Figura 4.35: Distribución de vuelos por día de la semana. Se observa una mayor concentración de operaciones durante los días hábiles frente a una disminución durante los fines de semana.

Finalmente, la caracterización del ciclo diario es vital para entender la carga horaria de las instalaciones. La Figura 4.36 detalla el perfil horario de los vuelos, diferenciando claramente las horas punta de los periodos valle. La actividad es prácticamente nula durante la madrugada (entre las 01:00 y las 03:00 horas), para luego experimentar un ascenso pronunciado a partir de las 04:00 horas aproximadamente. El sistema alcanza su máxima saturación alrededor de las 10:00 horas (cercano al 7 % del tráfico diario en una sola hora) y mantiene una meseta de alta actividad superior al 6 % hasta aproximadamente las 17:00 horas. A partir del final de la tarde, la cantidad de vuelos disminuye de manera constante hasta retornar a las horas valle nocturnas.

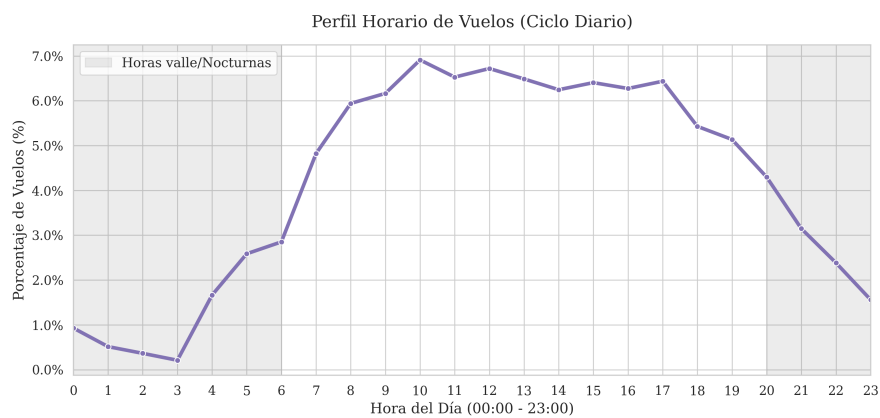


Figura 4.36: Perfil horario de vuelos a lo largo del ciclo diario. El área sombreada indica las horas valle o nocturnas, contrastando con la alta concentración de actividad en horario diurno.

Como se puede observar en estas imágenes, las dinámicas de la demanda de pasajeros, los itinerarios comerciales de las aerolíneas, los factores climáticos estacionales y los hábitos de movilidad de la población introducen fluctuaciones severas a lo largo de un ciclo anual, semanal y diario. Ahora para capturar estas variaciones e incorporarlas al modelo numérico, los algoritmos desarrollados permiten computar factores de modulación temporal discretizados. A modo de ventana empírica del comportamiento del modelo, se exponen a continuación las estructuras de perfiles temporales obtenidas para los años de estudio 2022 y 2023. Esta modelación abarca cuatro escalas fundamentales, las cuales son horaria, diaria (dentro de la semana), mensual y estacional, al igual que las mostradas anteriormente.

La Figura 4.37 expone el comportamiento de las emisiones a escala intradía (00:00 a 23:00 horas). El análisis de los vectores denota una estructura bimodal muy marcada y consistente en ambos periodos.

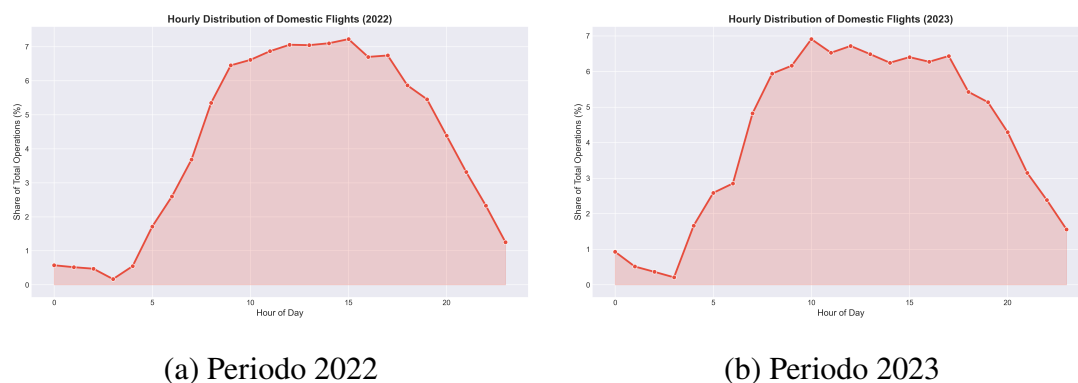
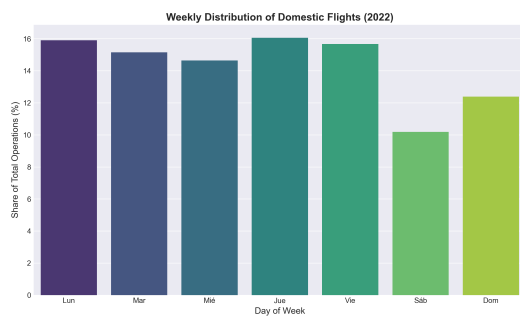


Figura 4.37: Distribución horaria normalizada del inventario de emisiones aeronáuticas para los años 2022 y 2023.

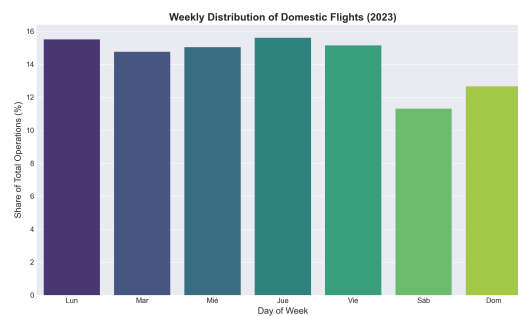
Durante la madrugada, específicamente entre las 01:00 y las 05:00 horas, se observa un valle profundo donde la actividad cae a mínimos operacionales debido a las restricciones de itinerario y el cierre de terminales secundarias. El primer pico de intensidad se consolida en la mañana, alcanzando su peak cerca de las 08:00 y 09:00 horas, tramo que coincide con la salida masiva de los vuelos domésticos troncales de primera hora. Posteriormente, tras un leve descenso al mediodía, el modelo acusa el máximo absoluto en el bloque vespertino-nocturno, concentrado entre las 18:00 y las 21:00 horas. Este segundo máximo responde a la sincronización de los retornos de vuelos regionales y la ventana de despacho de rutas internacionales de largo alcance, las cuales suelen despegar rezagadas al final del día para optimizar las conexiones en los aeropuertos de destino.

Al desplazar el análisis hacia la escala semanal, la Figura 4.38 discrimina el peso relativo de cada día de la semana (donde el lunes se indexa bajo el valor 0 y el domingo como 6).

A diferencia de los inventarios de emisiones vehiculares urbanas, donde los fines de semana registran caídas estructurales abruptas por el cese de los viajes laborales (*commuting*), el transporte aéreo sostiene una carga de operación homogénea. No obstante, se aprecian inflexiones particulares: el viernes (día 4) y el domingo (día 6) exhiben sistemáticamente los coeficientes de actividad más elevados. Este comportamiento refleja la superposición de dos fenómenos logísticos, ya que por un lado, se tiene la intensificación del tráfico corporativo de regreso al cierre de la semana laboral y por otro el flujo de pasajeros de turismo o visitas familiares que concentran sus traslados en los extremos del fin de semana. Los martes y miércoles, en contraposición, absorben los



(a) Periodo 2022

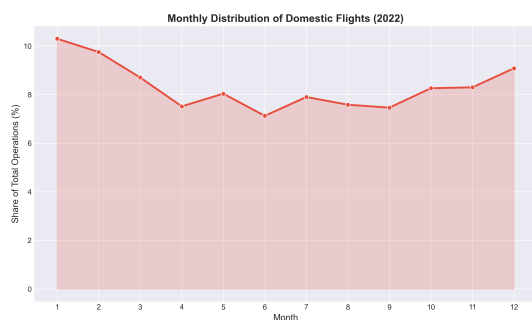


(b) Periodo 2023

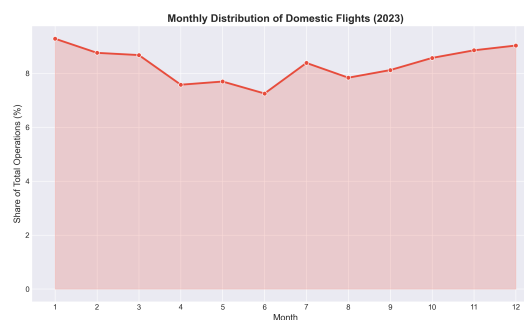
Figura 4.38: Modulaci3n diaria de las tasas de emisi3n a3rea a lo largo de la semana para los ciclos 2022 y 2023.

valles relativos de la curva, consolidándose como los d3as con menor presi3n sobre el espacio a3reo nacional.

El an3lisis macrosc3pico mensual, plasmado en la Figura 4.39, permite evaluar las tendencias macro de mediano plazo dentro del a3o calendario. Aqu3 se vuelve evidente un patr3n de estacionalidad vinculante para la modelaci3n de la calidad del aire.



(a) Periodo 2022



(b) Periodo 2023

Figura 4.39: Evoluci3n y fluctuaci3n mensual de la carga de emisi3n del transporte a3reo (Enero-Diciembre).

Las emisiones experimentan un incremento sustancial durante los meses de enero y febrero, tramo que coincide con el periodo estival y las vacaciones masivas en el hemisferio sur. Durante el invierno, se registra una contracci3n moderada en mayo y junio, rota 3nicamente por el repunte puntual de julio debido a las vacaciones escolares de invierno. Hacia el cierre del a3o, el mes de diciembre vuelve a presionar la curva al alza debido a las festividades de fin de a3o.

Un aspecto metodol3gico relevante al contrastar los dos gr3ficos que no se pede

no mencionar es que la curva de 2022 exhibe pendientes más pronunciadas y un crecimiento sostenido desde la mitad del año hacia adelante, comportamiento que delata el proceso de recuperación del tráfico comercial tras el levantamiento definitivo de las restricciones sanitarias transfronterizas. Para 2023, la serie temporal modelada se estabiliza en una forma sinusoidal más típica, reflejando un retorno a las condiciones de operación tradicionales del mercado aerocomercial.

Finalmente, la integración de estos datos bajo la taxonomía meteorológica estacional se presenta en la Figura 4.40. Esta discretización agrupa los meses en cuatro bloques estacionales definidos.

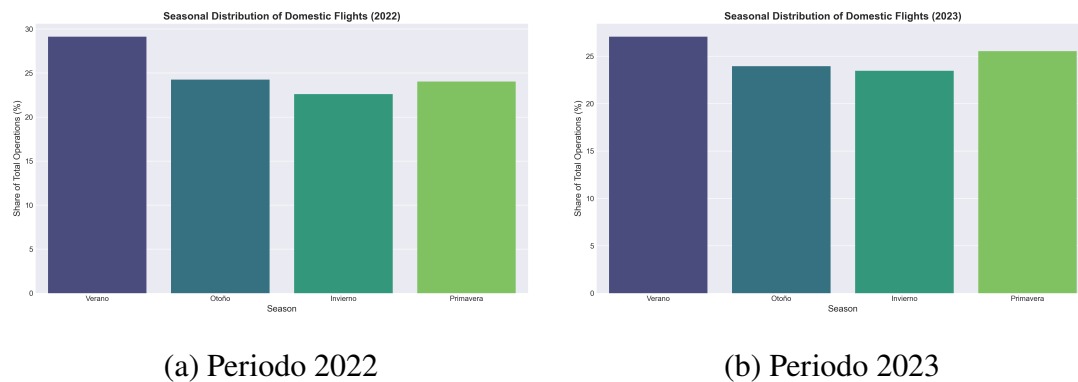


Figura 4.40: Porcentajes de distribución de emisiones aeronáuticas agregadas por estación climática.

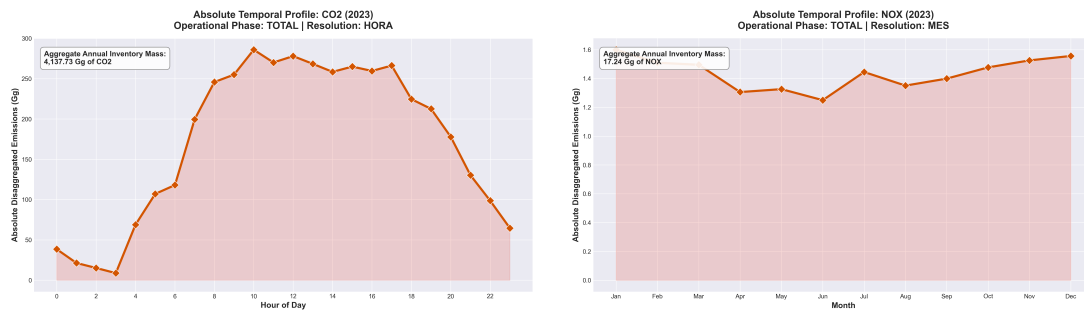
Las barras reafirman el predominio del verano como la estación con mayor tasa de emisión, concentrando de manera consistente cerca del 27 % al 28 % del total de los contaminantes anuales arrojados por las aeronaves. El invierno se sitúa en el extremo opuesto, absorbiendo las menores fracciones operativas del año.

La utilidad de esta agregación estacional es medular para la posterior calibración de los modelos de dispersión fotoquímica de contaminantes, en donde y como se mencionó con anterioridad, las altas emisiones aéreas del periodo estival se inyectan en una atmósfera con altas tasas de radiación solar y temperaturas elevadas, lo que acelera los mecanismos cinéticos de formación de contaminantes secundarios como el ozono troposférico ( $O_3$ ). Por otro lado, aunque el invierno registre menos emisiones brutas, el descenso de la capa de mezcla y los fenómenos de inversión térmica frecuentes en los valles chilenos provocan que el aporte minoritario de la fase de aproximación y despegue de los aviones (*Landing and Take-Off*, LTO) tenga un impacto crítico sobre las concentraciones de material particulado a nivel de suelo. La inclusión de estos factores

matriciales en el código de la tesis asegura que el inventario no se comporte de forma estática, sino que responda a la sincronía real del sistema bajo estudio.

La utilidad última de esta estructuración matricial de coeficientes radica en su capacidad para acoplarse dinámicamente con los volúmenes de emisión anuales previamente calculados. Al integrar los factores temporales de los perfiles horarios, diarios, semanales y/o mensuales con las masas globales de contaminantes, el modelo matemático deja de ser un inventario estático y se transforma en una herramienta predictiva con una resolución temporal de alta fidelidad.

A modo de ejemplo de esta capacidad de post-procesamiento, la Figura 4.41 ilustra las curvas continuas de emisión que el algoritmo exporta automáticamente. El panel (a) expone la evolución horaria detallada para el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a lo largo de un promedio del ciclo diario completo para el año 2023, permitiendo identificar con precisión la tasa de inyección de este gas de efecto invernadero en las ventanas críticas de tráfico aerocomercial. Por su parte, el panel (b) despliega la fluctuación de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) desagregadas mes a mes para el mismo periodo anual, mapeando el comportamiento del contaminante criterio bajo las transiciones estacionales de la demanda. La versatilidad del código programado faculta al investigador para aislar, cruzar y analizar el comportamiento de cualquier compuesto indexado frente a la escala cronológica que se requiera evaluar.



(a) Variación horaria de  $CO_2$  (2023)

(b) Tendencia mensual de  $NO_x$  (2023)

Figura 4.41: Gráficos de tendencia temporal continua exportados por el modelo numérico acoplado.

Más allá de las representaciones gráficas bidimensionales, la arquitectura del modelo contempla la exportación nativa de las matrices temporales en formatos estándar utilizados en la modelación atmosférica y geomática global. El sistema genera archivos estructurados en formato NetCDF (*Network Common Data Form*), los cuales almace-



nan las variables multidimensionales (contaminante, tiempo, latitud, longitud y altitud) indispensables para alimentar de forma directa modelos de calidad del aire a escala regional o global (tales como WRF-Chem o CMAQ). Asimismo, el script procesa de forma paralela archivos en formato GeoTIFF rasterizado, optimizados para su integración y análisis geoespacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta exportación modular se puede parametrizar de forma flexible para la ventana temporal que el estudio requiera, ya que el modelo permite aislar un mes específico de un año determinado, una semana epidemiológica particular, o un bloque horario de alta contingencia ambiental. Finalmente, aprovechando la naturaleza discreta de los pasos de tiempo procesados, el código automatiza la compilación de estas capas en visualizaciones dinámicas en formato GIF. Estas secuencias animadas permiten evaluar visualmente los pulsos y ondas de dispersión de los contaminantes a lo largo del territorio nacional, constituyendo un activo metodológico crítico que será utilizado en la defensa y presentación final de este trabajo de tesis.

Por otro lado, el comportamiento temporal de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) derivadas del tráfico aéreo nacional se detalla en la Figura 4.42, la cual expone el perfil de carga por hora junto con la fracción acumulada diaria.

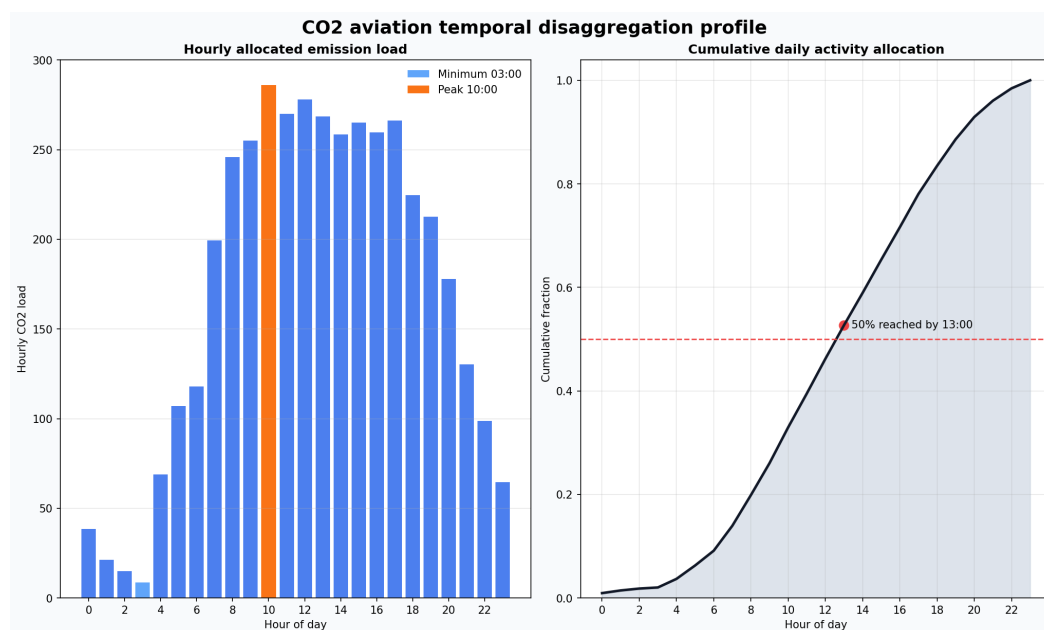


Figura 4.42: Perfil de desagregación temporal de emisiones de  $\text{CO}_2$  en la aviación chilena: asignación horaria de la carga operativa (izquierda) y fracción acumulada diaria (derecha).

Los resultados del perfil temporal de la Figura 4.42 exponen una clara asimetría entre los ciclos nocturnos y diurnos del tráfico aéreo. La actividad decae a su nivel mínimo absoluto a las 03:00 horas debido al cese de salidas comerciales regulares y restricciones operacionales. En contraste, la reactivación del flujo es abrupta a partir de las 04:00 horas, alcanzando el pico máximo de emisión a las 10:00 horas impulsado por la primera oleada de vuelos de conectar nacional. El nivel de emisión se estabiliza en una meseta alta entre las 09:00 y las 18:00 horas. Por su parte, la curva de distribución acumulada revela que el 50 % de la masa total de CO<sub>2</sub> diaria se alcanza exactamente a las 13:00 horas, evidenciando un patrón de operación balanceado pero concentrado en la ventana diurna convencional.

Para examinar cómo estos umbrales temporales crónicos se traducen geográficamente en el territorio nacional, la Figura 4.43 presenta el contraste cartográfico de la intensidad de emisión aérea entre los extremos de operación diaria.

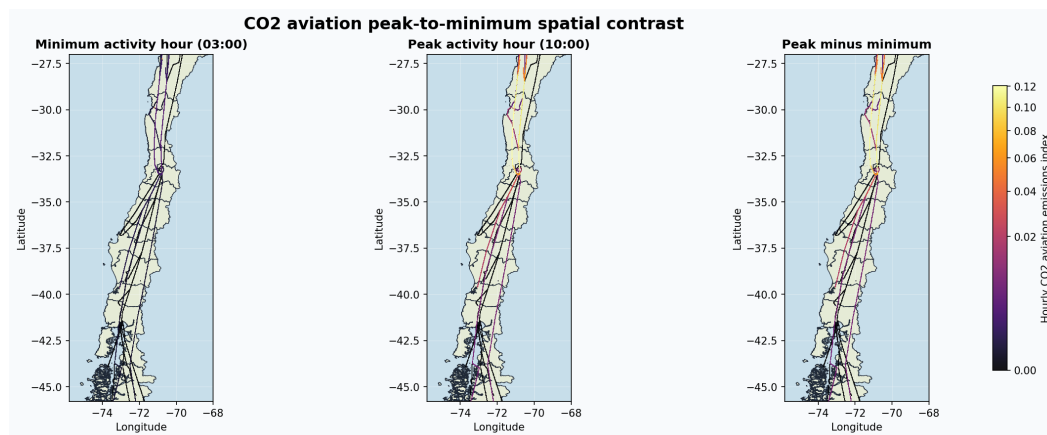


Figura 4.43: Contraste espacial de las emisiones de CO<sub>2</sub> por aviación en Chile para la hora de mínima actividad (03:00), hora pico (10:00) y balance diferencial neto.

La distribución geoespacial de la Figura 4.43 ratifica el carácter centralizado de la red aeronáutica nacional. Durante la madrugada (03:00 horas), las trayectorias lineales son marginales y se confinan de forma sutil en torno al nodo principal de la Región Metropolitana. A las 10:00 horas, la densificación de los vectores de flujo se hace evidente, delineando de forma nítida las rutas de alta demanda que conectan el centro del país con las regiones mineras del norte y los núcleos urbanos del sur. El mapa diferencial (*Peak minus minimum*) corrobora que la inyección contaminante neta no se dispersa homogéneamente, sino que se superpone estrictamente sobre los pasillos aéreos longitudinales y las zonas terminales de aproximación aeroportuaria, definiendo

las zonas prioritarias para la modelación de la calidad del aire en alta resolución.

## 4.4. Análisis Integrado Multimodal

Una vez obtenido los resultados y analizado el comportamiento espacio-temporal de cada modo de transporte, ahora se puede analizar todo en conjunto. El estudio conjunto de los sectores vial, aeronáutico y marítimo permite cuantificar la interferencia mutua de las distintas fuentes de transporte y determinar el peso relativo de cada modo en el inventario global de los distintos contaminantes analizados, a modo de ejemplo aquí se expondrá y analizará para los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Esta aproximación integrada resulta indispensable para identificar si la gobernanza de la calidad del aire debe centrarse en la planificación urbana terrestre o en la regulación de corredores de carga intermodales.

La dinámica temporal combinada de la carga integrada y el desglose de la participación modal horaria se presentan en la Figura 4.44.

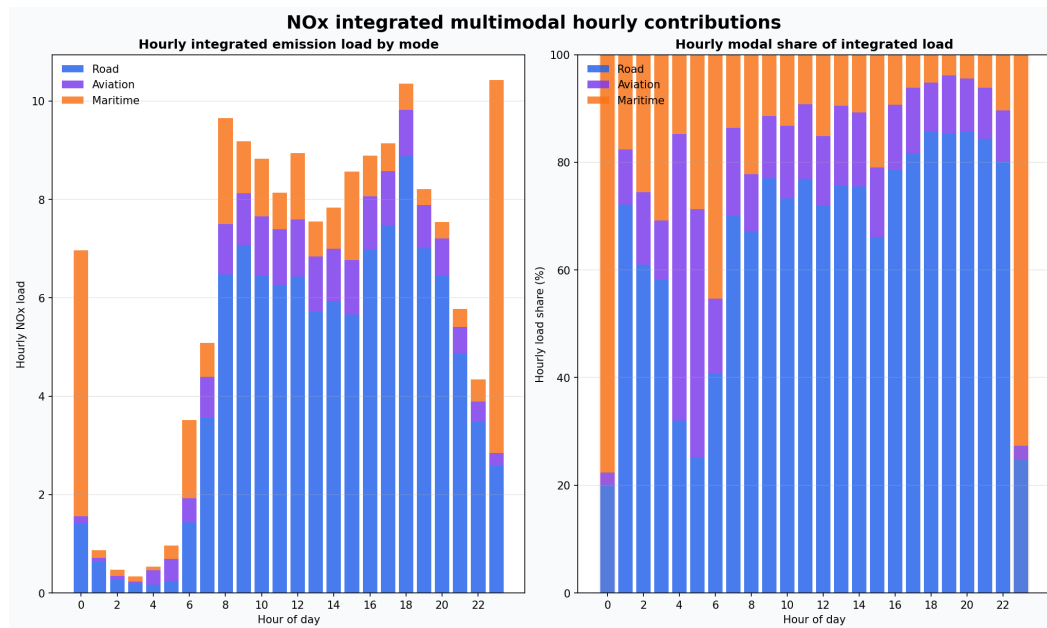


Figura 4.44: Contribución multimodal horaria al inventario integrado de  $\text{NO}_x$ : carga absoluta por modo (izquierda) y fracción porcentual de la participación horaria (derecha).

Los perfiles de la Figura 4.44 confirman que el transporte vial es el determinante crítico de la contaminación urbana durante el bloque diurno, llegando a representar entre el 80 % y el 90 % de la carga regional de  $\text{NO}_x$  entre las 08:00 y las 21:00 horas, con un

máximo absoluto de emisión a las 18:00 horas. Por su parte, la aviación encuentra su mayor representatividad relativa en la madrugada (04:00 a 05:00 horas), periodo en el que la drástica contracción del flujo vehicular terrestre eleva la participación aeronáutica por encima del 30 % del total integrado. Por su parte, el sector marítimo altera el balance en los extremos del ciclo diario (00:00 y 23:00 horas), ya que la acumulación discreta de registros administrativos en estos umbrales genera picos artificiales que dominan la estructura del inventario nocturno, capturando más del 65 % de la masa emitida en esas horas específicas.

Para comprender la distribución y coexistencia espacial de estas firmas de emisión a escala macro y regional, la Figura 4.45 expone la concentración del índice integrado en el eje central de Chile y la Región Metropolitana.

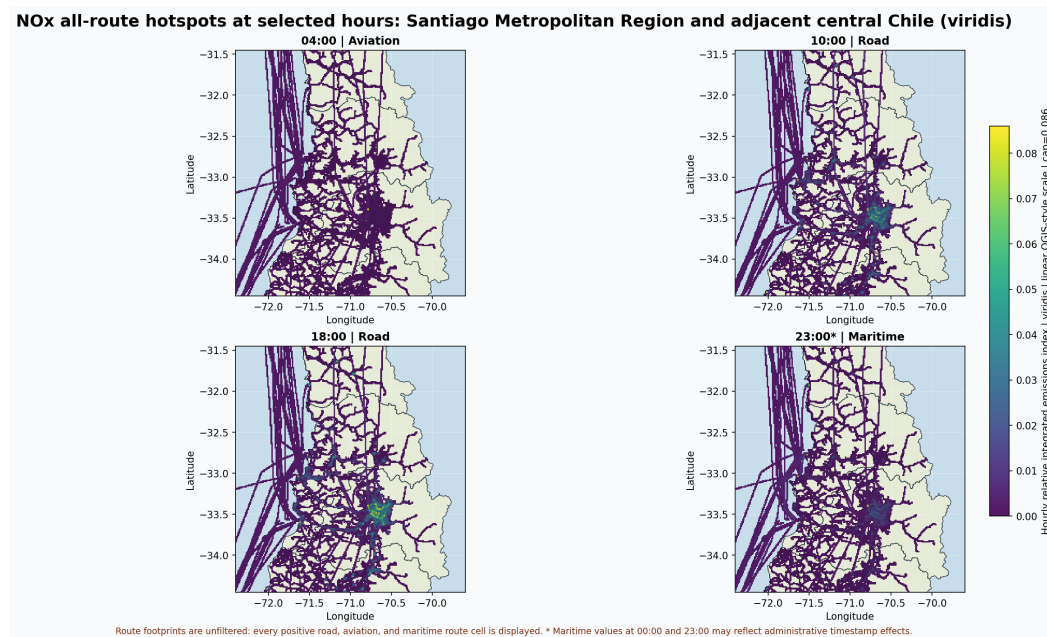


Figura 4.45: Mapas de calor integrados de NO<sub>x</sub> a escala regional en cuatro ventanas horarias críticas.

A nivel regional (Figura 4.45), la distribución de los puntos críticos (*hotspots*) transita fluidamente entre los tres modos según la hora evaluada. A las 04:00 horas, el mapa queda definido por trazas lineales de baja intensidad, las cuales deberían estar asociadas a las trayectorias de aproximación de la aviación comercial. Durante los periodos de alta actividad vial (10:00 y 18:00 horas), la señal sufre una fuerte contracción espacial, concentrándose de forma casi exclusiva en Santiago y los ejes estructurantes de la red de autopistas interurbanas, principalmente del anillo Américo Vespucio. Hacia

el cierre del ciclo (23:00 horas), el foco de atención se debiera desplazar hacia la fachada costera del Pacífico, donde los corredores de navegación marítima nacional y las zonas de fondeo portuario registran la mayor densidad del índice integrado de  $\text{NO}_x$ .

Finalmente, para evaluar el impacto de la fricción interna del transporte terrestre en la zona de mayor densidad habitacional, la Figura 4.46 acota el análisis al tejido urbano consolidado de Santiago y su anillo perimetral.

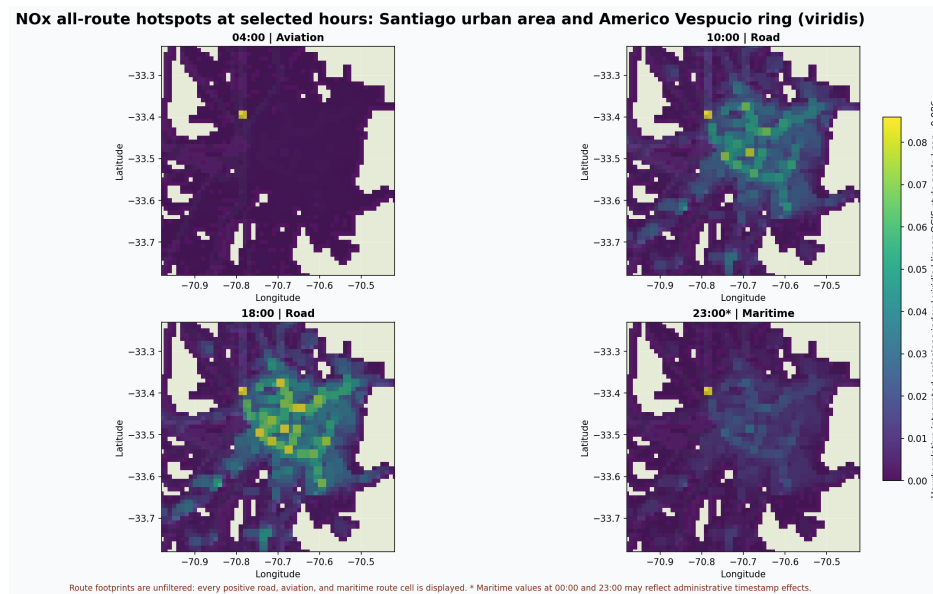


Figura 4.46: Distribución espacial de  $\text{NO}_x$  en el área urbana de Santiago y el anillo de la autopista Américo Vespucio.

El zoom metropolitano de la Figura 4.46 ilustra la microdinámica urbana. A las 04:00 horas, la ciudad no registra emisiones superficiales significativas, quedando únicamente expuestas las celdas de la grilla que intersectan los vectores de sobrevuelo aeronáutico superior. No obstante, en las horas de operación plena (10:00 y 18:00 horas), el mapa revela una saturación generalizada del radio urbano. La mayor intensidad se acopla perfectamente con la infraestructura de alta velocidad del anillo Américo Vespucio y las grandes arterias radiales que conectan el centro histórico con las comunas periféricas. La persistencia y el ensanchamiento del área crítica a las 18:00 horas denotan el efecto de la congestión vehicular extendida, consolidando al parque automotor como el principal vector de exposición poblacional a compuestos nitrogenados en el entorno metropolitano.

## 4.5. Conclusiones del Capítulo

La transición de un inventario anual estático a un modelo dinámico marca un punto de inflexión en la forma en que se aborda el impacto atmosférico del transporte multimodal en esta investigación llevada a cabo. A lo largo del trabajo desplegado y expuesto en este capítulo, quedó demostrado empíricamente que asumir una tasa de emisión constante a lo largo del año constituye una simplificación errónea que oculta los momentos críticos de exposición que se presentan dada la contaminación emitida por los tres modos de transporte analizados. Es evidente que los contaminantes no se inyectan a la atmósfera de forma plana, sino que respiran y fluctúan al ritmo propio de la congestión urbana, las operaciones logísticas y los ciclos meteorológicos.

Al analizar la serie histórica desde 1990 para el transporte terrestre y los perfiles de alta resolución asociados, la desagregación temporal destapó las verdaderas ventanas de estrés ambiental. En este ámbito, el análisis retrospectivo evidenció esa tensión constante entre el crecimiento desmedido del parque automotriz y el ingreso paulatino de nuevas normativas tecnológicas. A escala diaria, las curvas dibujan fielmente los pulsos de movilidad de la población, concentrando las descargas de gases de efecto invernadero y forzantes climáticos de vida corta en las horas punta de la mañana y la tarde.

Por el lado de la aviación, la estacionalidad dictó la pauta, ya que tras el análisis queda en evidencia que el repunte severo de las operaciones aéreas durante el periodo estival significa que el sector aeronáutico inyecta su mayor carga de precursores fotoquímicos justo en los meses donde la alta radiación solar y las temperaturas elevadas permiten confluir y acelerar la formación de ozono troposférico.

En cuanto al sector marítimo, se evidencia que este opera algo desfasado del ritmo urbano, aunque fuertemente anclado a los vaivenes de la macroeconomía. Observar cómo los factores de marcha interportuarios se disparan en marzo empujados por la exportación agrícola, o cómo se deprimen bruscamente en junio por los cierres de puerto derivados de las marejadas invernales, confirma que no se puede modelar el cabotaje sin entender el contexto geográfico y comercial. Se comprobó que cada bahía tiene una huella temporal propia y única que depende estrictamente de su vocación industrial.

Más allá de la lectura estadística de estas curvas y tendencias, el mayor triunfo metodológico de esta fase es la consolidación de los modelos espacio-temporales realizados y también la consolidación operativa de los datos, ya que traducir cientos de miles

de registros y perfiles fraccionales en formatos '.csv' en archivos multidimensionales estandarizados, entre los que se incluyen los formatos NetCDF y GeoTIFF generados, cierra el círculo de esta etapa de modelación. El sistema desarrollado no es una simple estimación tabular, sino que se ha convertido en un insumo directo, compatible y listo para alimentar simuladores avanzados de calidad del aire a mesoescala, como WRF-Chem o CMAQ.

Con las dimensiones espaciales y cronológicas finalmente acopladas y validadas, el inventario base adquiere la robustez necesaria para soportar simulaciones de largo plazo. El terreno metodológico queda completamente despejado para enfrentar el siguiente desafío, el cual corresponde a proyectar este complejo entramado de emisiones hacia el año 2050 y someter a prueba los escenarios de mitigación y descarbonización que definirán el futuro de la matriz de transporte a nivel nacional.

## 5. Proyección de Emisiones al Año 2050

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los modelos generados para la proyección de emisiones a futuro para los distintos contaminantes y medios de transporte, los cuales a su vez fueron simulados bajo distintos escenarios de mitigación, cuantificando de manera precisa y quirúrgica cuanto mitiga cada uno de los escenarios planteados para cada medio de transporte.

Para realizar esto correctamente y de manera precisa, en primera instancia es necesario simular como crecerá la demanda de transporte para cada uno de los casos, por lo cual es necesario hacer un levantamiento y cruce voluminoso de información y realizar un análisis econométrico para encontrar la tasa de crecimiento de cada transporte, la cual está fuertemente ligada a la tasa de crecimiento del PIB y a una elasticidad que rige la relación respectiva.

A lo largo de este capítulo se analizará en detalle cada uno de los escenarios simulados para cada modo de transporte, mostrando y cuantificando correctamente como impacta cada escenario a los distintos contaminantes de interés, dado que cada medida simulada impacta de manera no homogénea a todos los contaminantes, es decir, no todos los contaminantes se ven afectados por igual dada las medidas de mitigación, por lo que es necesario analizar en detalle cada medida y cuantificar exactamente como impactará esta medida a cada contaminante estudiado en esta investigación. Algo importante a destacar es que para cada modo se han simulado diversos escenarios con mitigaciones distintas, y todas estas están fuertemente alineadas con planes y políticas tanto nacionales como internacionales.

### 5.1. Transporte Terrestre

El motor fundamental de cualquier modelo predictivo de emisiones recae en la estimación precisa de la demanda de movilidad futura. En el marco del transporte terrestre, esta variable se cuantifica a través del indicador de Vehículos-Kilómetro Viajados (VKT). Para dotar de robustez a la proyección hacia el año 2050, el modelo de actividad desarrollado en esta investigación fue sometido a un riguroso proceso de validación cruzada. Se contrastaron las trayectorias generadas (identificadas como modelo propio o “David”) frente a los resultados obtenidos en estudios académicos previos (modelo “Benjamín”) y los reportes oficiales del Estado de Chile ante la Convención Marco de



las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, materializados en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC).

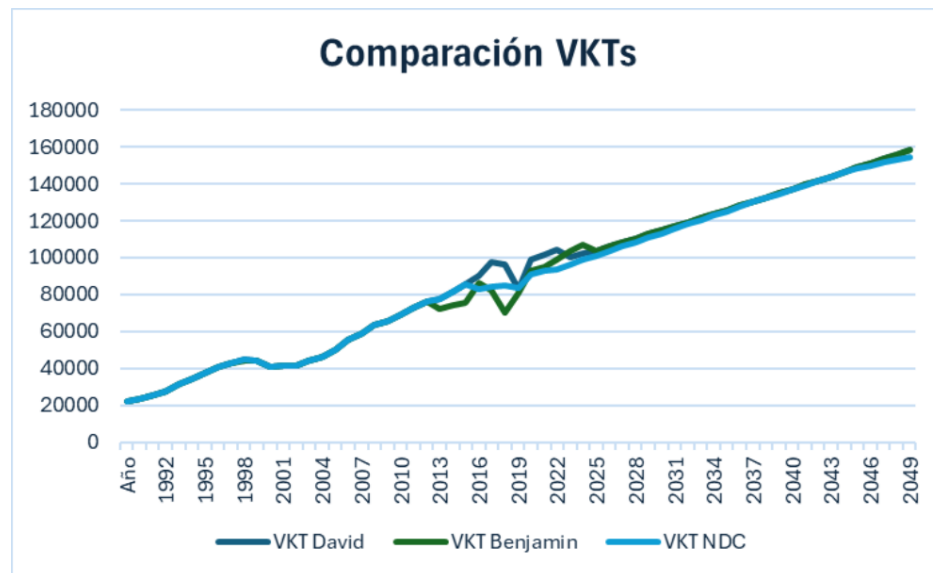


Figura 5.1: Comparación histórica y proyectada de la actividad vehicular (VKT). Se observa una fuerte convergencia a largo plazo entre el modelo propuesto, estudios previos y los compromisos NDC.

Como se evidencia en la figura 5.1, la trayectoria macroscópica del VKT exhibe un crecimiento casi lineal y sostenido hacia el futuro, superando los 150.000 millones de kilómetros recorridos al final del horizonte de evaluación. Si bien la tendencia a largo plazo muestra un acoplamiento notable entre los tres modelos, la dinámica en el corto plazo presenta discrepancias. Es por esto que para cuantificar estas diferencias, se calculó la diferencia porcentual simétrica anualizada, cuyo resultado se expone en la figura 5.2.

El histograma de divergencia revela que los modelos mantienen un error relativo inferior al 2 % durante la mayor parte de la serie histórica y proyectada. Es evidente que surge un pico de divergencia significativo en la ventana temporal 2018-2021. Este desacople transitorio no obedece a un error algorítmico, sino a las distintas estrategias metodológicas adoptadas para modelar las anomalías estadísticas derivadas del estallido social y los confinamientos masivos por la pandemia de COVID-19. Mientras que los estudios previos y la NDC suavizaron estas caídas o utilizaron factores de recuperación distintos, el presente modelo captura con mayor agresividad el cese temporal de la movilidad, convergiendo nuevamente hacia la normalidad estadística a partir del año

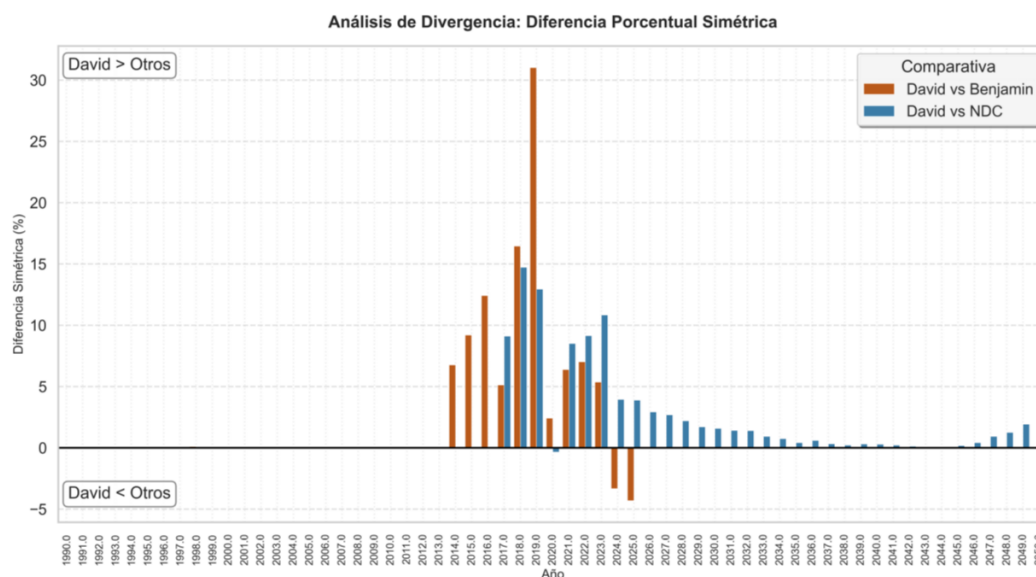


Figura 5.2: Análisis de divergencia mediante diferencia porcentual simétrica del VKT. El desfase máximo se concentra en el periodo de disrupción operativa 2018-2021.

2025 en donde los 3 modelos predicen esta demanda de transporte de manera similar, verificando que el modelo propuesto es correcto y se condice con las proyecciones oficiales chilenas expresadas mediante la NDC.

Una vez validada esta demanda de movilidad mediante la proyección y verificación del VKT, se ejecutó el módulo de cálculo termodinámico para proyectar las emisiones bajo un escenario *Business as Usual* (BAU). Este escenario asume la continuidad de las políticas públicas actuales, sin la introducción de medidas de mitigación disruptivas adicionales a las normativas de entrada ya vigentes. Para facilitar el análisis simultáneo de múltiples especies químicas, los resultados fueron normalizados tomando como línea base de valor unitario el año 2024.

La figura 5.3 expone el paradigma operativo del parque automotriz chileno a futuro. A pesar de que la cantidad de kilómetros recorridos continuará en ascenso continuo (como se demostró con el VKT anteriormente expuesto), prácticamente todos los contaminantes locales, incluyendo el material particulado ( $PM_{2,5}$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) y carbono negro ( $BC$ ), describen una curva de descenso progresivo. Esta caída empírica, que reduce a la mitad las emisiones de varias especies hacia 2050, es la consecuencia directa de la inercia de recambio tecnológico, dada la salida natural de vehículos antiguos (pre-Euro y Euro I-III) y su reemplazo por flotas equipadas con filtros de partículas diésel (DPF) y sistemas de reducción catalítica

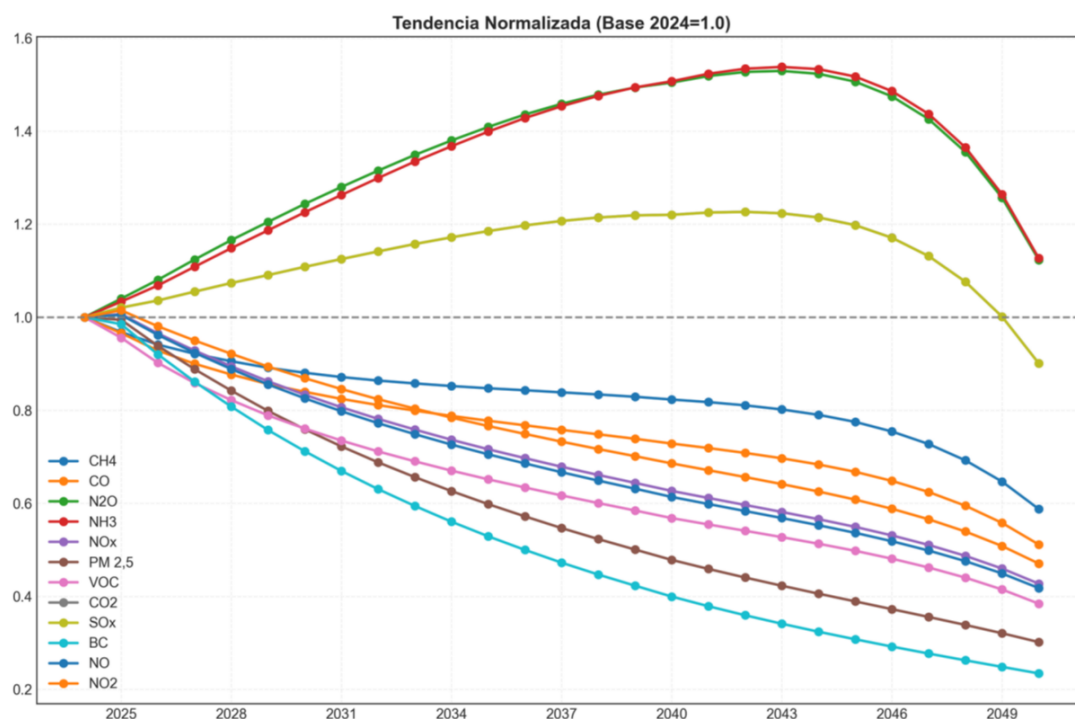


Figura 5.3: Evolución proyectada y normalizada de contaminantes para el escenario BAU (Base 2024 = 1.0). Destaca la caída generalizada de precursores tóxicos y la resistencia a la baja del  $CO_2$ .

selectiva (SCR) bajo normativas Euro VI o superiores.

No obstante, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y los compuestos de azufre ( $SO_x$ ) presentan una resistencia sistémica. El  $CO_2$  continúa su escalada hasta alcanzar un punto de inflexión cercano al año 2040, momento en el cual el incremento masivo de la flota finalmente se ve compensado por la mayor eficiencia de los motores modernos y una incipiente cuota natural de vehículos de bajas emisiones.

Para otorgar consistencia final a la herramienta predictiva, se contrastaron los resultados absolutos de las proyecciones de este trabajo frente a las estimaciones logradas en el desarrollo académico anterior (Benjamín), evaluando tanto gases de efecto invernadero como precursores críticos de calidad del aire.



Figura 5.4: Contraste de proyecciones absolutas (1990-2050). Izquierda: Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ). Derecha: Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ). Las series temporales ratifican la estabilidad del cálculo en ambos extremos del espectro de combustión.

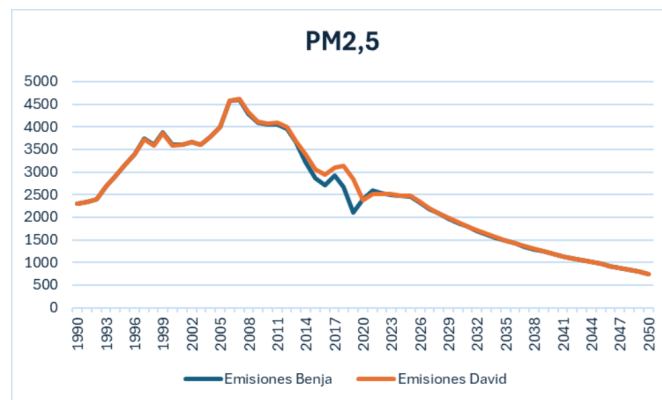


Figura 5.5: Comparación de trayectorias proyectadas para el Material Particulado Fino ( $PM_{2,5}$ ).

La superposición de las curvas de  $CO_2$  y  $NO_x$  (figura 5.4) ratifica la robustez estructural del modelo. Las diferencias en el volumen de dióxido de carbono proyectado

en la década 2020-2030 responden exclusivamente a la divergencia del VKT explicada anteriormente debido a los ajustes de la pandemia, convergiendo a la perfección en el horizonte 2050 al rozar los 30 millones de toneladas. Por su parte, la proyección de  $NO_x$  sigue un trazado idéntico, validando que los factores de emisión asociados a la degradación de los catalizadores y ciclos operativos en vehículos pesados fueron correctamente parametrizados. Asimismo, el comportamiento del material particulado fino (figura 5.5) sella la validación térmica y de actividad. El modelo desarrollado reproduce exitosamente la caída exponencial del  $PM_{2.5}$  proyectada en los estudios precedentes, confirmando que la base de datos de recambio de flota, vida útil de vehículos comerciales y exigencias de ingreso al parque nacional se encuentra correctamente sincronizada, sentando las bases operativas para simular escenarios de descarbonización más ambiciosos.

### **5.1.1. Simulación de Escenarios Tecnológicos y Penetración de Electromovilidad**

La proyección de la actividad vehicular (VKT) establece la demanda de movilidad futura, pero el impacto ambiental de dicho volumen dependerá estrictamente de la matriz energética que impulse al parque automotriz como se mencionó con anterioridad. Por lo tanto, antes de someter el modelo a alteraciones tecnológicas, es necesario definir la composición basal del parque a lo largo del horizonte de evaluación.

Como ilustra la figura 5.6, la distribución de la carga de transporte no sufrirá variaciones estructurales bruscas en su composición por segmento. Los vehículos livianos de pasajeros (VLP) continuarán absorbiendo la fracción mayoritaria del kilometraje nacional, seguidos por los vehículos comerciales y el transporte de carga. Esta inercia tipológica confirma que cualquier estrategia orientada a la descarbonización profunda debe apuntar, imperativamente, a la transformación del parque liviano privado.

Para cuantificar la sensibilidad del inventario de emisiones frente a distintas velocidades de transición energética, el modelo fue sometido a cuatro escenarios discretos de penetración de electromovilidad. Cada escenario altera las tasas de recambio y la cuota de mercado de los vehículos cero emisiones (ZEV) frente a los motores de combustión interna.

El escenario *Business as Usual* (BAU) asume una penetración inercial de la tecnología eléctrica, traccionada únicamente por la maduración del mercado internacional y la paridad de precios proyectada, sin subsidios disruptivos adicionales.

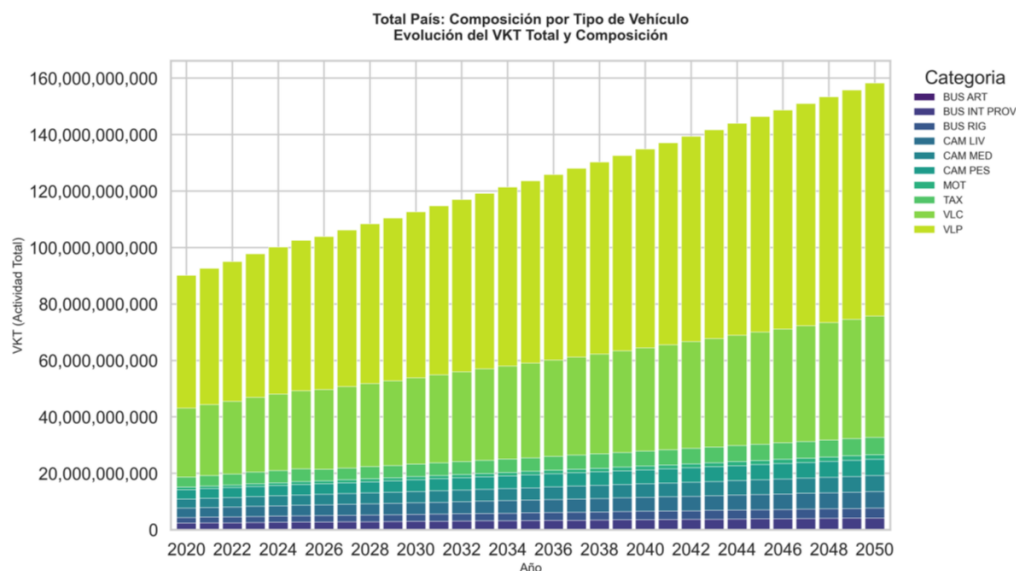


Figura 5.6: Proyección del VKT segregado por tipología vehicular. Los vehículos livianos de pasajeros (VLP) y comerciales (VLC) mantienen la hegemonía del flujo vial hacia mediados de siglo.

En la figura 5.7 se observa que las normativas pre-Euro 6 desaparecen casi por completo alrededor del año 2035. A partir de ese punto, la movilidad terrestre se sostiene sobre un duopolio tecnológico: motores de combustión Euro 6 y una cuota creciente de vehículos eléctricos. Si bien la electromovilidad logra una participación visible (barra verde oscuro), no consigue desplazar a la combustión interna como la matriz principal del país al año 2050.

Por otro lado, y con el fin de aislar matemáticamente el beneficio ambiental de los vehículos eléctricos, se simuló un escenario extremo de control donde se anula por completo la venta y operación de tecnologías ZEV.

La supresión de la variable eléctrica (figura 5.8) fuerza al modelo a cubrir toda la demanda de VKT utilizando motores de combustión. El resultado es un monopolio absoluto de la normativa Euro 6 a partir de la década de 2040. Este escenario resulta vital metodológicamente, ya que establece el límite superior ("peor caso.<sup>en</sup> términos de GEI) contra el cual se medirán las toneladas de carbono mitigadas en las demás trayectorias.

El escenario pesimista internaliza posibles barreras sistémicas, tales como retrasos en la infraestructura de carga, estancamiento en el costo de las baterías de litio o fallas en la implementación de la Estrategia Nacional de Electromovilidad.

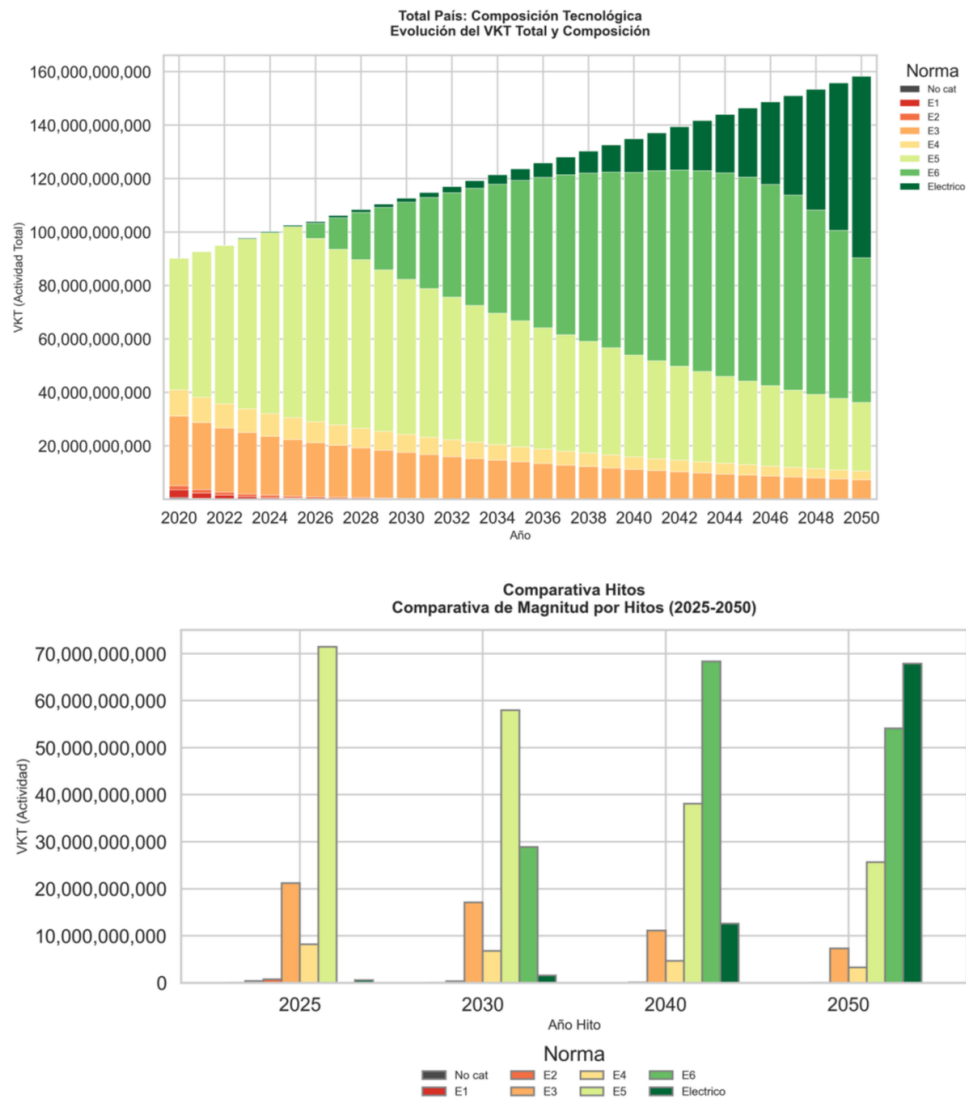


Figura 5.7: Evolución del parque en el Escenario BAU. Arriba: Transición tecnológica continua del VKT. Abajo: Comparativa de magnitud por hitos temporales. La norma Euro 6 domina el mercado, mientras la tracción eléctrica gana terreno gradualmente hacia 2050.



Figura 5.8: Escenario contrafactual con nula penetración eléctrica. Arriba: Absorción total del crecimiento por motores térmicos. Abajo: Saturación de la norma Euro 6 en los hitos de proyección.





Figura 5.9: Evolución bajo el Escenario Pesimista. El retardo en la adopción tecnológica comprime la cuota de mercado eléctrico, obligando a extender la vida útil y presencia operativa de motores térmicos.

Al analizar las barras de hitos en la figura 5.9, el bloque de actividad eléctrica al año 2050 se reduce drásticamente en comparación al BAU. Esta compresión obliga al parque automotriz a recostarse nuevamente sobre la norma Euro 6 para suplir el déficit de movilidad. En términos de emisiones, este escenario retrasa el año pico de generación de  $CO_2$  y aplaza de forma indefinida cualquier aspiración de carbono neutralidad sectorial.

Finalmente, el escenario optimista inyecta al modelo las restricciones duras de las metas oficiales del Estado. Supone el éxito de las políticas de incentivo, la prohibición efectiva de ventas de vehículos de combustión livianos para 2035 y la electrificación acelerada del transporte público y flotas comerciales.

La geometría de la figura 5.10 marca un quiebre radical respecto a las simulaciones anteriores. A partir de 2035, el estrangulamiento de la oferta térmica comienza a erosionar agresivamente la cuota de la norma Euro 6. Al proyectar la matriz hacia el año 2050, la tracción eléctrica (verde oscuro) logra el ansiado *sorpasso* tecnológico, capturando más de dos tercios de la actividad vehicular total del país. Este escenario es el único capaz de forzar una caída vertical en la curva de emisiones de gases de efecto invernadero, como se verá más adelante, alienando el desempeño del transporte con los compromisos climáticos internacionales de Chile.

### **5.1.2. Efecto Actividad versus Efecto Tecnología**

Para comprender a cabalidad las fuerzas que gobiernan la trayectoria de los gases de efecto invernadero hacia mediados de siglo, es indispensable aislar el impacto del crecimiento inercial del parque automotriz frente a los avances en la eficiencia de los propulsores y la penetración de nuevas plataformas energéticas. La evolución del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) opera como el indicador termodinámico principal para evaluar esta relación. Bajo las condiciones del escenario de referencia, la matriz final de emisiones queda sometida al predominio de la movilidad privada y logística. El análisis de Pareto proyectado al año 2050 (figura 5.11, izquierda) establece que los vehículos livianos particulares (VLP) y comerciales (VLC) consolidarán su posición como las fuentes más críticas del sistema, concentrando por sí solos la fracción mayoritaria del inventario nacional. Al integrar esta huella de carbono a lo largo del periodo 2020-2050 (figura 5.11, derecha), la acumulación histórica rompe la barrera de las 1.200 millones de toneladas, materializando el enorme peso ambiental que implica sostener las políticas actuales sin alteraciones disruptivas.

La causa subyacente de este incremento estructural se devela al descomponer las

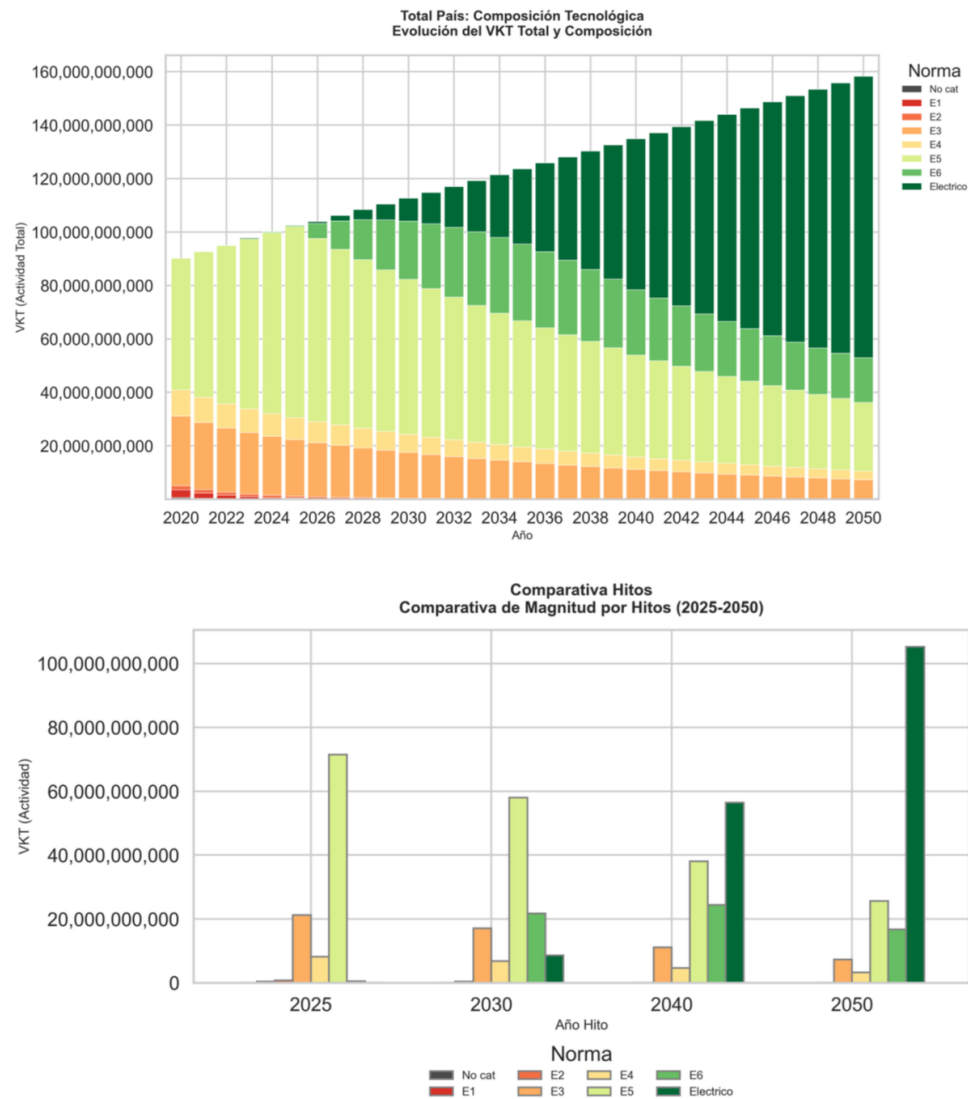


Figura 5.10: Dinámica del Escenario Optimista. La transición forzada invierte la matriz energética hacia el año 2050, transformando a la electromovilidad en la fuerza motriz predominante del parque automotriz chileno.

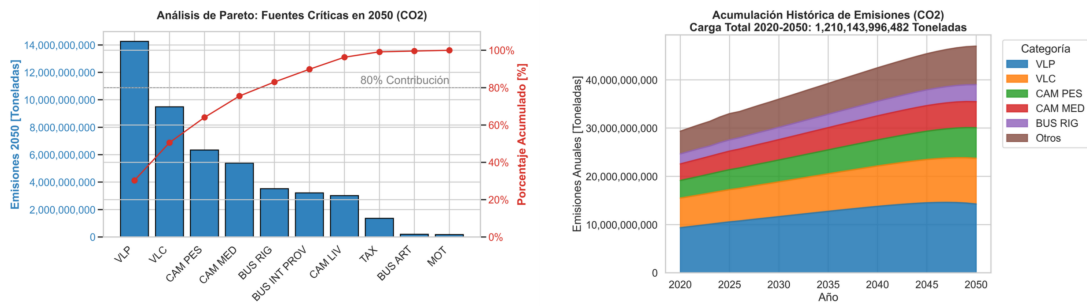


Figura 5.11: Caracterización del escenario BAU al 2050. Izquierda: Análisis de Pareto que identifica a los segmentos livianos como focos críticos de emisión. Derecha: Proyección de la acumulación histórica de  $CO_2$  durante el periodo de evaluación.

variaciones numéricas respecto al año base 2020. En la figura 5.12, el diagrama de cascada cuantifica esta dualidad, en donde se presenta que la mitigación lograda por el recambio tecnológico inercial (barra verde) es ínfima frente al abrumador aumento provocado por la tasa de motorización y la demanda de viajes (barra roja).

El seguimiento del índice de actividad versus eficiencia confirma esta disociación. Mientras la cantidad de kilómetros recorridos (VKT) tracciona el sistema alzándose por sobre un índice de 175 respecto a la base, el factor de emisión promedio de la flota exhibe un estancamiento prolongado. Es evidente que la eficiencia de los motores de combustión interna modernos es insuficiente para compensar el volumen de vehículos ingresados, arrastrando inevitablemente la curva de emisiones totales al alza.

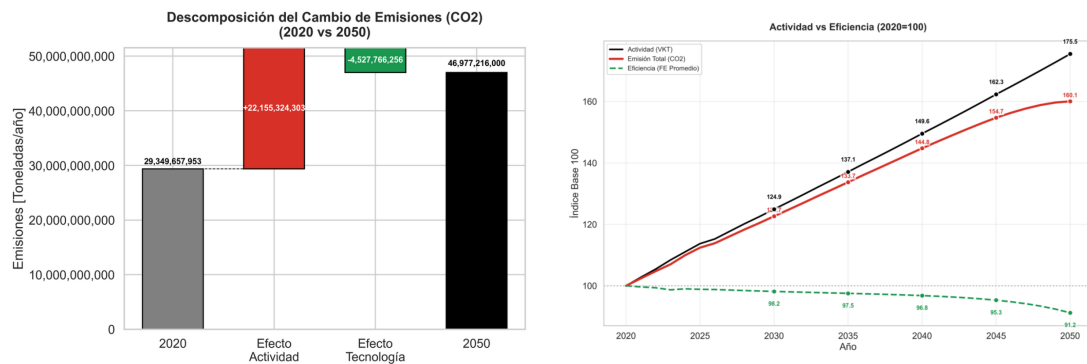


Figura 5.12: Mecánica interna del escenario sin electromovilidad. Izquierda: Descomposición de la variación de  $CO_2$  (2020 vs 2050), evidenciando la incapacidad de la tecnología actual para frenar la expansión del parque. Derecha: Divergencia sostenida entre el aumento de la actividad vehicular y el estancamiento de la eficiencia.

La introducción matemática de normativas de eficiencia supremas, equivalentes al

estándar Euro 7 y sumado a la adopción acelerada y subsidiada de la electromovilidad, altera la física del sistema. La modelación del escenario base demuestra empíricamente que es factible desacoplar el desarrollo del transporte terrestre respecto a su huella climática.

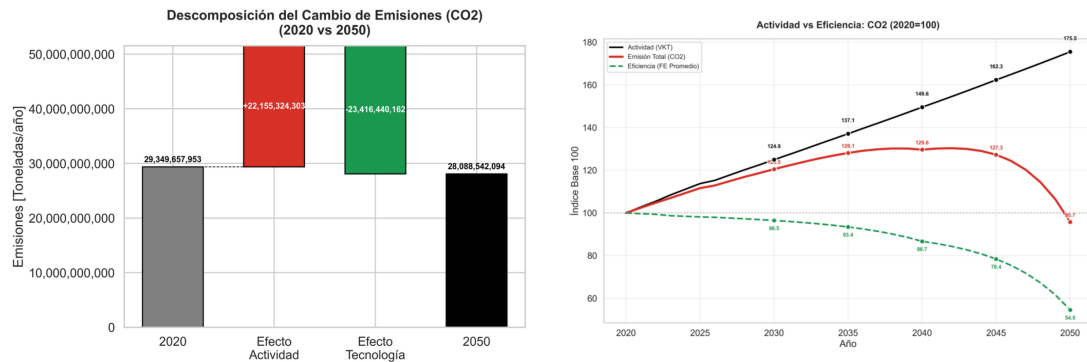


Figura 5.13: Desempeño estructural bajo el Escenario Base. Izquierda: La penetración tecnológica (barra verde) adquiere la magnitud necesaria para anular la presión de la actividad. Derecha: Desplome del factor de emisión a partir de la década de 2030, forzando a la curva de  $CO_2$  a descender por debajo de los niveles iniciales.

Al someter esta matriz al mismo proceso de descomposición (figura 5.13), el efecto tecnología invierte por completo su rol operativo. La inyección sostenida de plataformas más eficientes y cero emisiones tracciona el factor de emisión promedio hacia un desplome acelerado a partir del año 2035. Esta mejora radical en la eficiencia sistémica del parque (barra verde de contracción) alcanza una proporción geométrica suficiente para absorber el total de la demanda generada por el crecimiento de la actividad. Como resultado directo, las toneladas emitidas hacia finales de 2050 se deprimen hasta quebrar la barrera inicial, cerrando el ciclo con emisiones netas inferiores a las cuantificadas en 2020. Este comportamiento comprueba que una gestión pública agresiva enfocada en la matriz energética tiene la capacidad matemática y operativa de gobernar la curva ambiental, doblegando la inercia demográfica y logística del país.

Además, es importante destacar que el modelo permite incorporar la entrada en vigencia de la futura normativa Euro 7 y asume una penetración gradual pero firme de los vehículos eléctricos (EV), variables que reconfigurarán estructuralmente el perfil de la matriz vehicular en las próximas décadas.

La Figura 5.14 expone el panorama agregado a nivel nacional, entregando una perspectiva macro de la magnitud del recambio tecnológico que experimentará el país.

Si bien el consolidado global muestra una tendencia clara, los matices de esta

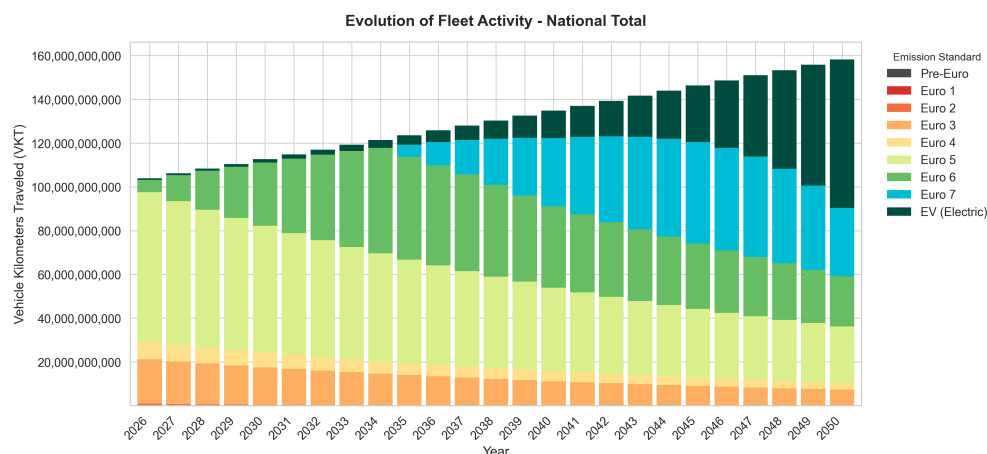


Figura 5.14: Evolución histórica y proyectada de la actividad de la flota a nivel nacional (Total VKT) bajo el escenario BAU.

transición obligan a desglosar el análisis por segmento. Los vehículos comerciales y de uso particular tienen ciclos de recambio bastante más acelerados y presentan una mayor elasticidad frente a la disponibilidad de nuevas tecnologías, tal como se refleja en la Figura ??.

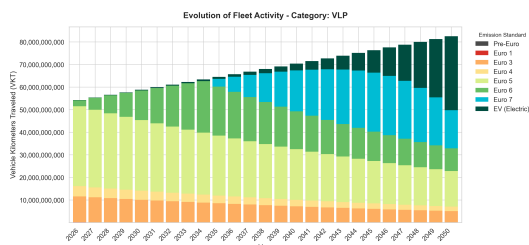


Figura 5.15: Trayectoria de los Vehículos Livianos de Pasajeros (VLP).

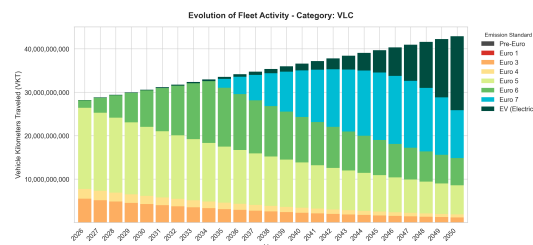


Figura 5.16: Trayectoria de los Vehículos Livianos Comerciales (VLC).

El transporte de carga terrestre enfrenta un escenario tecnológico y financiero distinto, ya que se debe considerar que en Europa también la normativa Euro 7 comenzará a aplicar con desfase respecto a los vehículos livianos. Por otro lado, las exigencias de potencia y autonomía imponen barreras naturales para la adopción temprana de ciertas tecnologías. La Figura ?? detalla las proyecciones específicas para las categorías de carga de distinto tonelaje.

Al revisar el comportamiento de estos gráficos salta a la vista el peso absoluto del segmento de vehículos livianos de pasajeros (VLP), el cual tracciona la mayor parte de la demanda de movilidad en el país. Hacia el año 2050, el volumen proyectado de

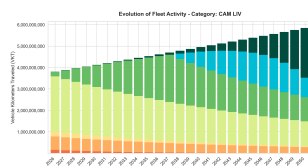


Figura 5.17: Actividad VKT: Camiones Livianos.

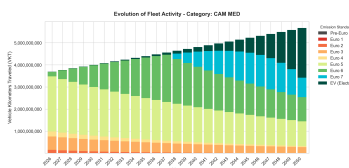


Figura 5.18: Actividad VKT: Camiones Medianos.

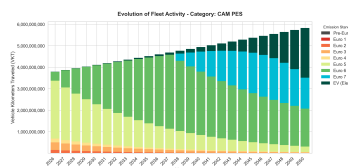


Figura 5.19: Actividad VKT: Camiones Pesados.

esta categoría supera los 80 mil millones de kilómetros anuales, arrastrando consigo la porción más grande de la actualización tecnológica del parque. La adopción del estándar Euro 7 en estos vehículos livianos (tanto VLP como VLC) entra con bastante agresividad a partir de 2035, operando casi como una barredora que para mediados de la década de 2040, logra desplazar mayoritariamente a las normas antiguas y a las franjas pre-Euro. La realidad para la maquinaria pesada es un poco más rígida como se comentó con anterioridad. Las curvas correspondientes a los camiones demuestran una fuerte inercia histórica, vinculada a que el despegue de la electrificación total en estos estratos recién se insinúa pasada la barrera de 2038. Este retraso responde también a las limitantes actuales en la densidad energética de las baterías, un factor crítico para mover altos tonelajes a través de largas rutas interurbanas sin penalizar la carga útil del transportista. A pesar de este despegue tardío, hacia el final del horizonte de modelación se asume una masificación eléctrica brutal que penetra fuertemente incluso en el estrato de camiones pesados. Esto deja una lectura clara sobre el rol de la normativa Euro 7, la cual no será el estándar definitivo de la industria motriz, sino más bien se situará como una tecnología puente. Su labor principal será mitigar y contener las emisiones durante la ventana de 15 a 20 años que tardará la electromovilidad en sortear sus actuales cuellos de botella logísticos para dominar las carreteras del país.

Para complementar la mirada puramente volumétrica de los kilómetros recorridos, resulta esencial y fundamental revisar cómo se reconfigura la cuota de mercado en términos estrictamente porcentuales. La transición tecnológica hacia cero emisiones no es un proceso lineal. Por el contrario, opera mediante distintas olas de sustitución donde las normativas entrantes canibalizan progresivamente a las flotas más envejecidas.

Un recurso sumamente clarificador para entender esta dinámica de reemplazo es el mapa de calor a nivel nacional. La Figura 5.20 ilustra la intensidad de penetración de cada estándar de emisiones, revelando el ocaso inevitable de la norma Euro 5, la cual arranca como el pilar hegemónico a fines de esta década, para ir diluyéndose paulatinamente a medida que la regulación Euro 6, Euro 7 y la electromovilidad reclaman su espacio en

el parque automotor.

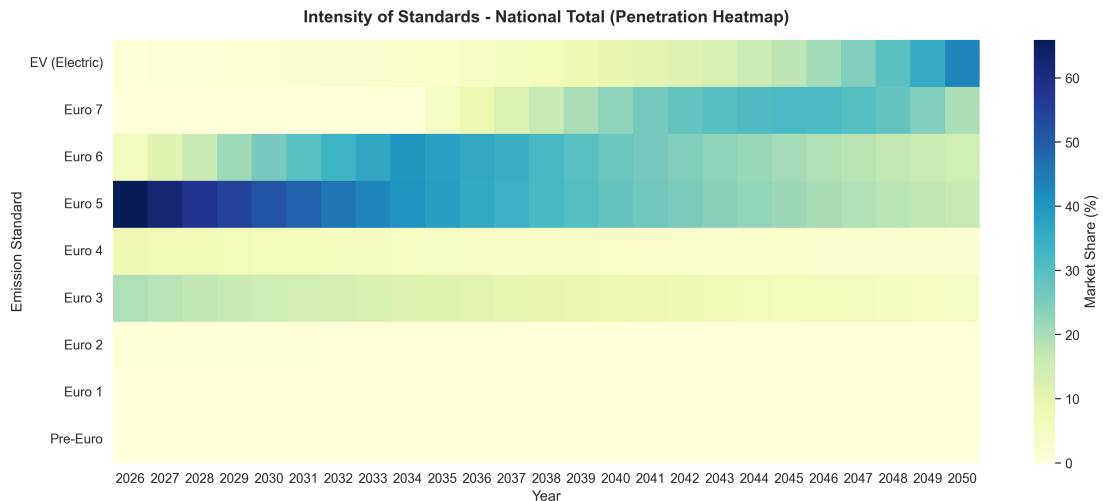


Figura 5.20: Mapa de calor de la penetración de estándares de emisión a nivel nacional (2026-2050). La intensidad del color refleja la cuota de mercado relativa de cada tecnología.

Para ponerle números concretos a las gradientes de este mapa, resulta útil realizar cortes transversales cada cinco años. La Figura 5.21 desagrega el total nacional en hitos clave, mostrando un cambio de paradigma profundo al cruzar la frontera de la próxima década. Si nos fijamos en el año 2040, se aprecia un punto de inflexión donde la norma Euro 7 ya ha capturado un 23,1 % de la flota operativa, mientras que los vehículos eléctricos (EV) comienzan a tener una masa crítica cercana al 9,3 %. Diez años después, el salto de la tecnología cero emisiones absorbe prácticamente todo el crecimiento vegetativo del parque, logrando un 42,9 % de participación agregada hacia mediados de siglo.

Sin embargo, estas cifras nacionales esconden brechas de adopción notorias entre los distintos rubros del transporte. Al aislar y contrastar los vehículos livianos de pasajeros frente a los camiones de alto tonelaje, el desfase temporal de la electrificación salta a la vista casi de inmediato.

Los autos particulares (Figura 5.22), impulsados por un ecosistema comercial más maduro y menores barreras de carga domiciliaria, empujan fuertemente la estadística global, logrando reducir la cuota de los motores a combustión tradicionales de manera acelerada.

En la vereda opuesta y por el contrario, la logística de carga pesada (Figura 5.23) demuestra una resiliencia estructural hacia el diésel. Durante gran parte de la década



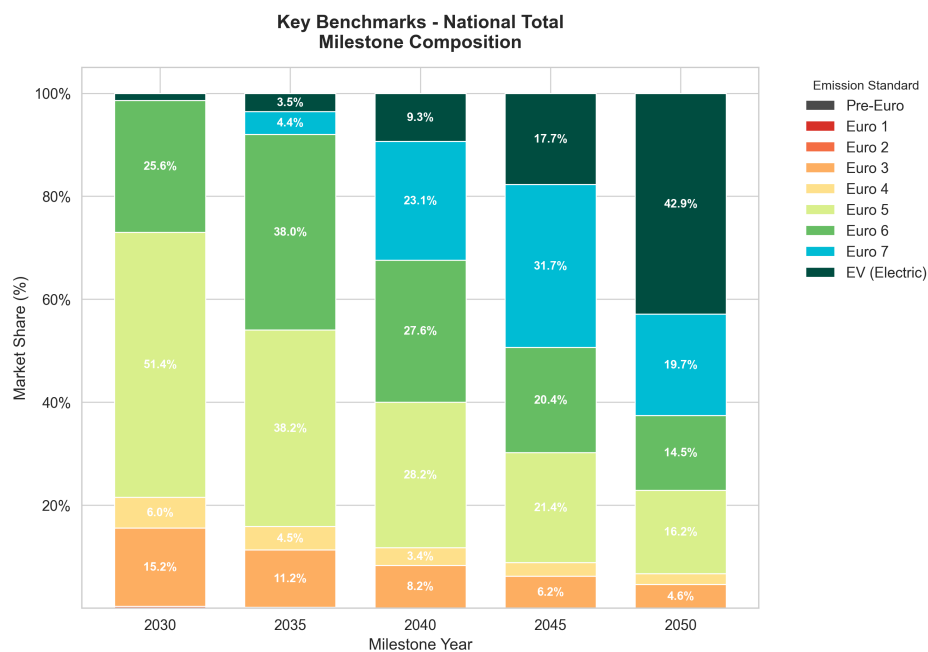


Figura 5.21: Composición porcentual de la flota nacional en hitos clave (2030 - 2050), evidenciando el avance del estándar Euro 7 y la electrificación.

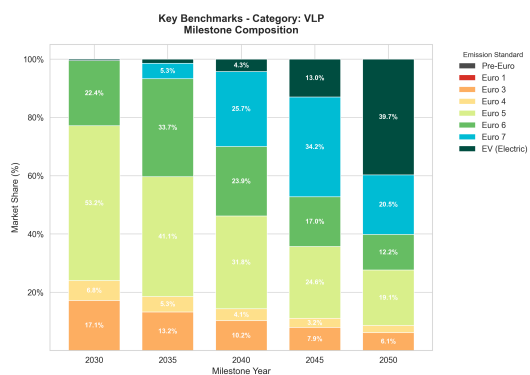


Figura 5.22: Hitos de adopción tecnológica para la categoría de Vehículos Livianos de Pasajeros (VLP).

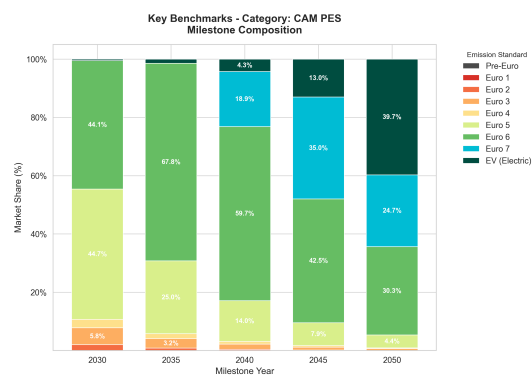


Figura 5.23: Hitos de adopción tecnológica para la categoría de Camiones Pesados (CAM PES).

del 2030, el sector dependerá casi exclusivamente de la convivencia entre flotas Euro 6 (44,1 % en 2030) y la entrada gradual del estándar Euro 7 (que alcanza un 18,9 % en 2040). Recién para el hito del 2045 la electrificación en este segmento logra quebrar los dos dígitos (13,0 %), para luego proyectar un crecimiento agresivo que lo deja rozando el 40 % al cierre del ciclo modelado. Esta convergencia tardía ratifica que, para la industria de transporte pesado, las regulaciones intermedias de alta exigencia térmica seguirán siendo el pilar de reducción de emisiones mientras se resuelven los cuellos de botella de la infraestructura de recarga en ruta.

### **5.1.3. Análisis de Proyecciones de Emisiones: Escenario Base vs. Euro 7**

Para evaluar el impacto a largo plazo solo de la adopción de la normativa Euro 7, se realizó una simulación de las emisiones vehiculares en el periodo comprendido entre 2024 y 2050. Este análisis contrasta la evolución inercial del parque automotriz (Escenario Base) con la introducción gradual de las nuevas exigencias ambientales, clasificando los resultados según el tipo de contaminante y la categoría vehicular.

A modo de ejemplo, se presenta en esta tesis el comportamiento global de las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Este muestra una tendencia decreciente estructural, explicada principalmente por el retiro de circulación de las unidades más antiguas y su reemplazo por tecnologías vigentes menos contaminantes. Como se puede observar en la Figura 5.24, la brecha entre ambas curvas recién comienza a hacerse visible hacia el año 2030. Bajo las exigencias de la normativa Euro 7, el descenso se acentúa de forma sostenida, logrando una reducción marginal respecto al escenario base que se consolida al aproximarse al año 2050.

Al desagregar estas emisiones por categoría, la contribución de los vehículos pesados de carga experimenta una dinámica particular. La Figura 5.25 expone que la reducción en camiones es continua, sin embargo, las diferencias entre ambos escenarios son más discretas en este segmento. Esto se vincula a los ciclos de renovación de flota más prolongados en el transporte de carga pesada, desplazando los beneficios más significativos de la norma hacia la segunda mitad de la década de 2030.

Por el contrario, el segmento de vehículos ligeros presenta una respuesta un poco más inmediata y más pronunciada frente a la nueva regulación. Tras un repunte inicial en el año 2025, asociado a la tasa de motorización, las emisiones de  $\text{NO}_x$  en la Figura 5.26 disminuyen de forma acelerada en el escenario Euro 7. La separación de las trayectorias

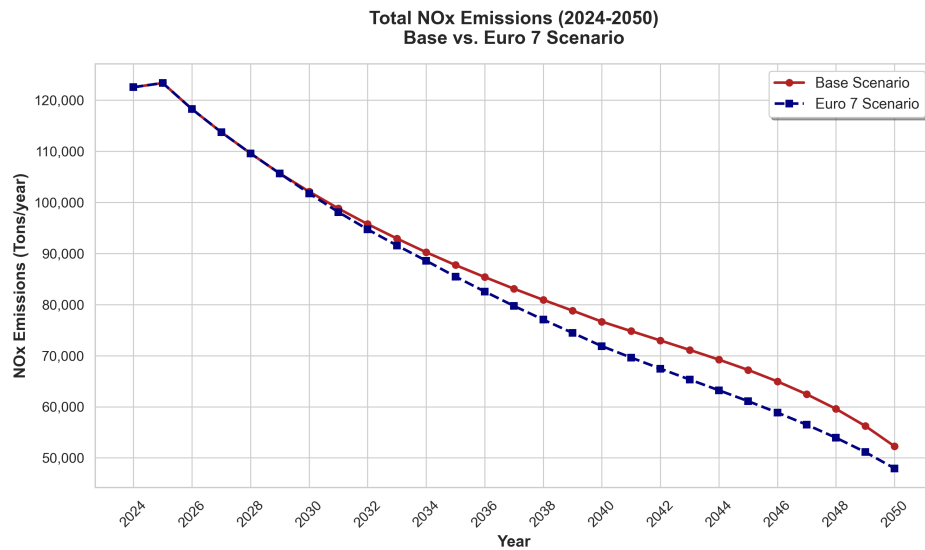


Figura 5.24: Comparación de las emisiones totales de  $\text{NO}_x$  entre el escenario base y el escenario Euro 7 (2024-2050).

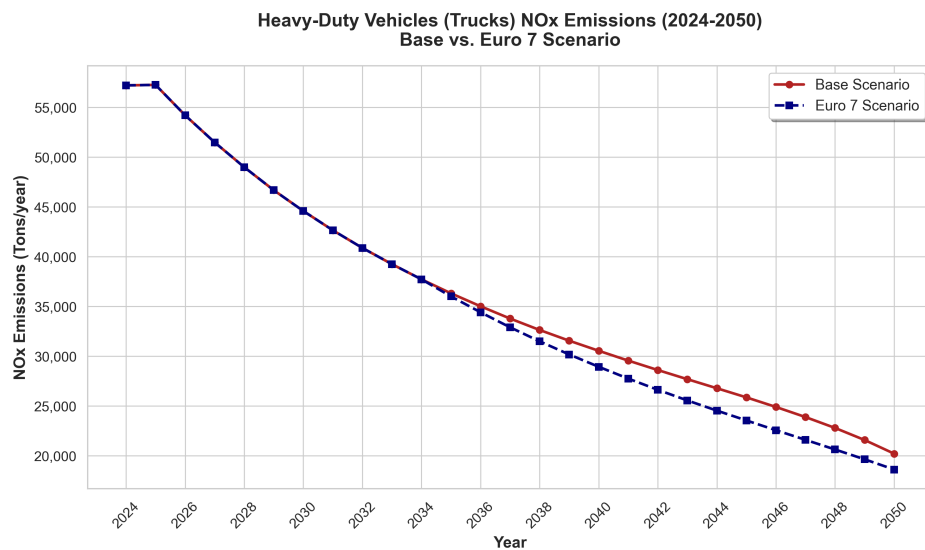


Figura 5.25: Evolución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en vehículos pesados (camiones) bajo los dos escenarios en estudio.

es clara desde el inicio de la década de 2030, demostrando la alta efectividad que poseen los nuevos límites de emisiones sobre los automóviles particulares y comerciales ligeros.

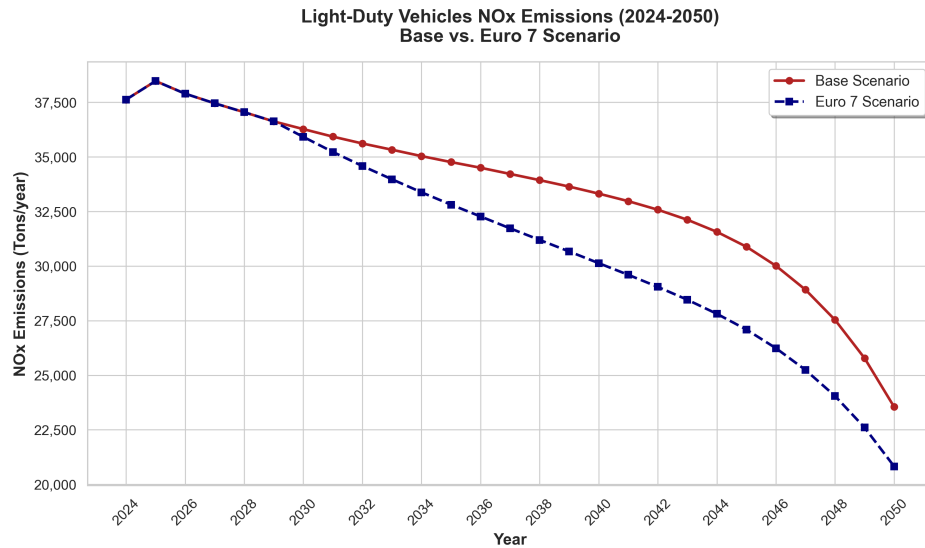


Figura 5.26: Emisiones proyectadas de NO<sub>x</sub> para la categoría de vehículos ligeros.

Ahora bien, a diferencia de los contaminantes locales, las proyecciones de gases de efecto invernadero reflejan el efecto combinado del crecimiento de la actividad del transporte y los avances en eficiencia energética vehicular.

En la Figura 5.27 se despliegan las emisiones de CO<sub>2</sub> del segmento ligero. Las curvas adoptan una forma cóncava, alcanzando su punto máximo en torno al año 2040 debido al aumento neto del parque circulante. No obstante, el escenario Euro 7 mitiga el pico de la curva y acelera el descenso posterior, lo cual se atribuye a las mejoras mecánicas colaterales y a la aceleración en la transición hacia tecnologías de propulsión eficientes.

Este beneficio se magnifica al analizar el balance general de todo el sector automotriz. La Figura 5.28 demuestra que el escenario regulado no solo disminuye la magnitud máxima de las emisiones, sino que también anticipa el cambio de tendencia (punto de inflexión) hacia mediados de la década de 2030, a diferencia del escenario base donde esto se prolonga casi hasta 2044.

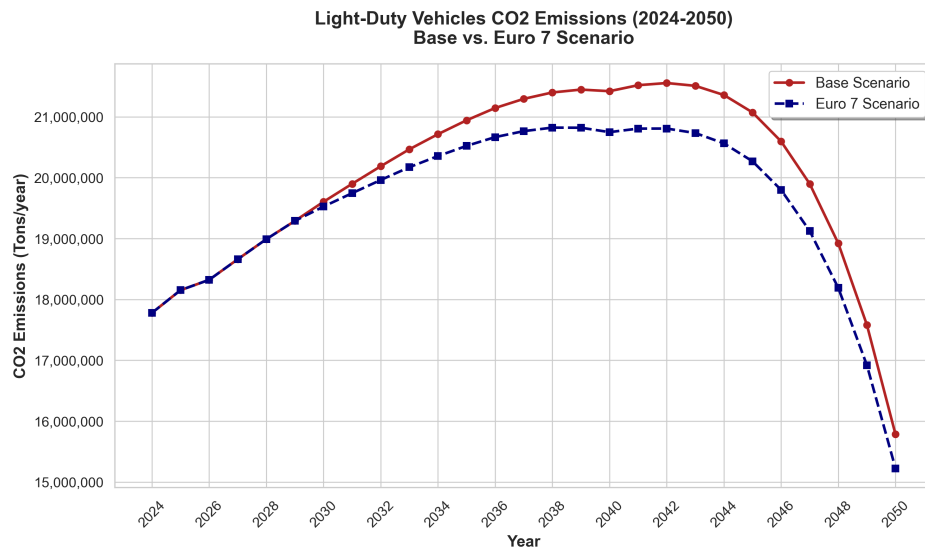


Figura 5.27: Trayectoria temporal de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el parque de vehículos ligeros.

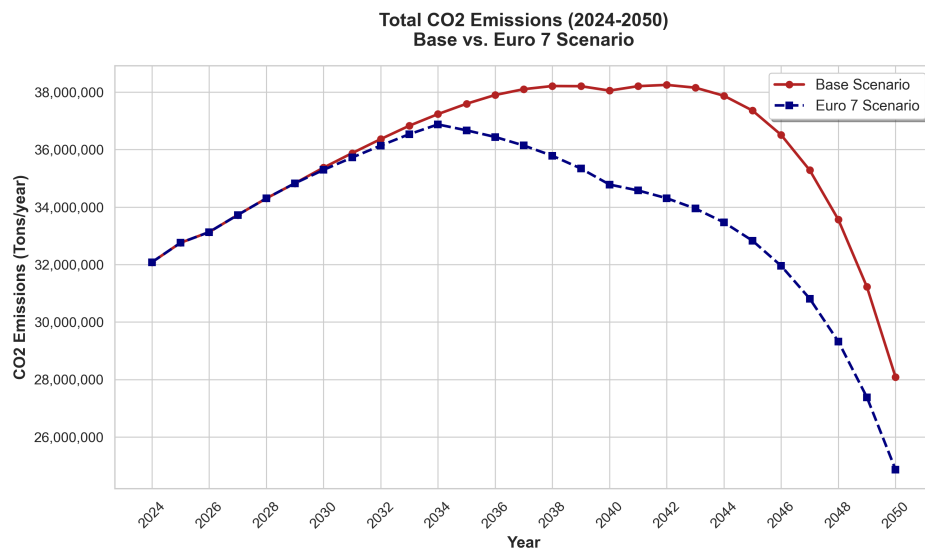


Figura 5.28: Emisiones globales del sector automotriz expresadas en toneladas de CO<sub>2</sub> por año.

### 5.1.4. Cuantificación del Potencial de Abatimiento y Emisiones Evitadas

La evaluación de distintas trayectorias tecnológicas carece de peso analítico si no se cuantifica la brecha de emisiones entre ellas. Para transformar las curvas de proyección en indicadores útiles para la política pública, se debe calcular el potencial de abatimiento, definido como la masa acumulada de contaminantes que el sistema evita liberar a la atmósfera al transitar desde un escenario base hacia uno más exigente. Este análisis se ha dividido en dos frentes comparativos fundamentales, por un lado el impacto aislado de la electromovilidad inercial y también el beneficio adicional de forzar una transición acelerada.

Para dimensionar el valor ambiental de la penetración inercial de vehículos eléctricos dictada por el mercado, se contrastó el escenario de referencia (BAU) contra el escenario contrafactual nulo (Sin Electromovilidad). El área comprendida entre ambas curvas representa el ahorro neto atribuible exclusivamente a la adopción espontánea de tecnologías cero emisiones.

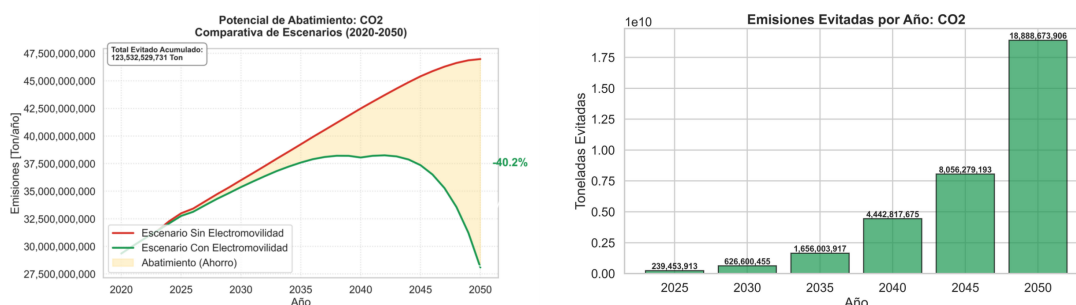


Figura 5.29: Potencial de abatimiento de  $CO_2$  (BAU vs. Sin Electromovilidad). Izquierda: Área de mitigación acumulada que representa un ahorro del 40.2 % hacia el final del periodo. Derecha: Crecimiento exponencial de las toneladas evitadas anualmente, superando las 18.800 millones al año 2050.

Al evaluar el dióxido de carbono (figura 5.29), la divergencia entre los escenarios comienza a hacerse estadísticamente significativa a partir de la década de 2030. La curva verde del escenario BAU logra separarse de la trayectoria térmica pura, generando una bolsa de abatimiento que, hacia el año 2050, se traduce en una reducción relativa del 40.2 %. El gráfico de barras anualizadas ratifica este comportamiento exponencial, en donde se evidencia que a medida que los vehículos eléctricos ganan participación de mercado, las emisiones evitadas se multiplican, confirmando que la tecnología ZEV es

el único mecanismo efectivo para contener la huella de carbono a largo plazo.

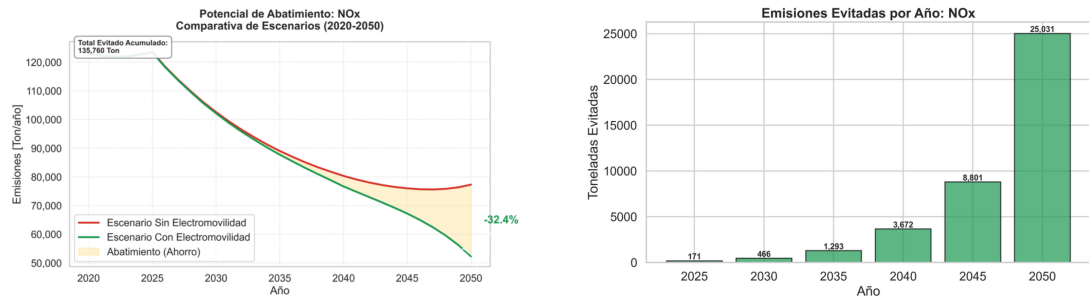


Figura 5.30: Potencial de abatimiento de  $NO_x$  (BAU vs. Sin Electromovilidad). Izquierda: Desacople de las trayectorias con un 32.4 % de mitigación final. Derecha: Distribución de las toneladas de óxidos de nitrógeno evitadas por año.

El impacto sobre los contaminantes locales, como los óxidos de nitrógeno (figura 5.30), presenta una morfología similar pero con márgenes más conservadores (32.4 % de ahorro final). Esto se debe a que, incluso en el escenario sin electromovilidad, la entrada en vigencia de la norma Euro 7 ya fuerza una reducción drástica de los  $NO_x$ , acotando el margen de mejora que los vehículos eléctricos pueden aportar sobre la calidad del aire respecto a lo que logran sobre los gases de efecto invernadero.

La segunda fase de la evaluación consiste en medir el esfuerzo adicional requerido para alinear al sector transporte con los compromisos climáticos nacionales. Para ello, se calculó la brecha entre el escenario de referencia (BAU) y el escenario optimista, asumiendo el cumplimiento irrestricto de las cuotas de ventas de vehículos de cero emisiones.

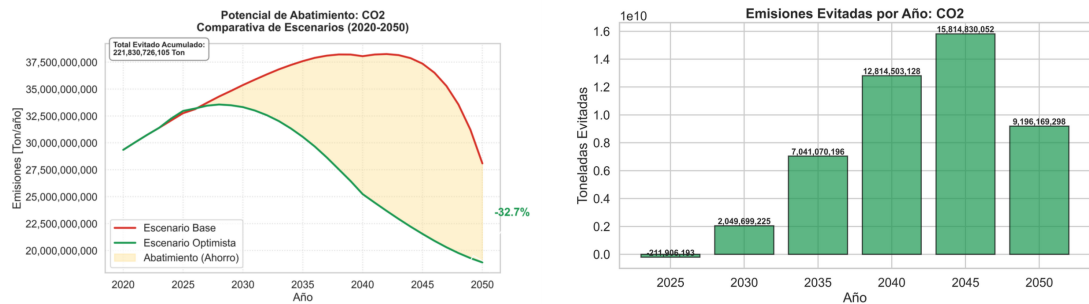


Figura 5.31: Esfuerzo de mitigación adicional para  $CO_2$  (Optimista vs. BAU). Izquierda: La intervención normativa fuerza el descenso de la curva logrando un ahorro extra del 32.7 %. Derecha: Toneladas adicionales mitigadas por año gracias a la restricción a las ventas térmicas.

Los resultados para el  $CO_2$  (figura 5.31) demuestran que la inercia del mercado no es suficiente. El escenario optimista logra prácticamente "doblegar" la curva de emisiones totales, generando un área de abatimiento adicional masiva. Un aspecto técnico a destacar en el gráfico de barras es la existencia de valores negativos transitorios en los primeros años de la proyección (e.g., año 2025). Este fenómeno obedece a las dinámicas de renovación acelerada, en donde forzar el retiro anticipado de vehículos y aumentar la tasa de fabricación/incorporación de flota nueva impone una carga de actividad inicial que se compensa rápidamente a medida que la flota eléctrica entra en operación plena.

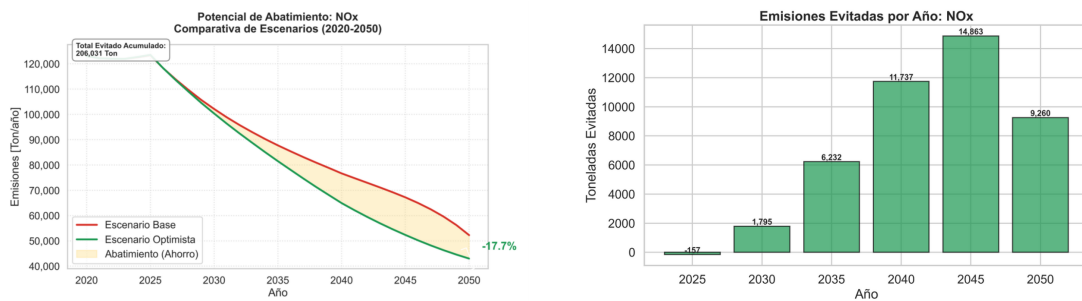


Figura 5.32: Potencial de abatimiento complementario de  $NO_x$  (Optimista vs. BAU). La aceleración tecnológica recorta un 17.7 % extra sobre las proyecciones inerciales de calidad del aire.

Por último, la comparativa optimista para los  $NO_x$  (figura 5.32) confirma la ley de rendimientos decrecientes en la mitigación de contaminantes locales. Obligar a una electrificación total entrega un ahorro adicional del 17.7 % por sobre el escenario BAU. Esta cuota, aunque menor porcentualmente en comparación al  $CO_2$ , representa decenas de miles de toneladas de precursores tóxicos erradicados de los centros urbanos, lo que se traduce directamente en la prevención de episodios críticos de salud pública.

### 5.1.5. Efecto de la Expansión de la Red de Metro en la Transferencia Modal

Evaluar proyectos de infraestructura de transporte masivo exige necesariamente aislar su impacto del crecimiento que experimentan las ciudades. La planificación estratégica para la red de Metro de Santiago, que contempla la futura entrada en operación de nuevas líneas, genera un fenómeno de transferencia modal innegable. Quienes antes



dependían de vehículos motorizados particulares o de superficie, optan por la rapidez del tren subterráneo, alterando la carga sobre la malla vial.

La Figura 5.33 grafica precisamente esta brecha a nivel de kilómetros recorridos (VKT). La línea punteada superior acusa la inercia del sistema bajo un escenario donde no se ejecutan las obras de expansión. Contrastando con esto, el gap que se genera entre esta curva punteada y la zona azul representa la masa de kilómetros que los vehículos dejarán de transitar gracias a la absorción de demanda por parte de la nueva infraestructura. Es interesante notar que la demanda en el resto del país mantiene una pendiente constante, pero la intervención focalizada en la capital logra quebrar drásticamente la tendencia de saturación urbana.

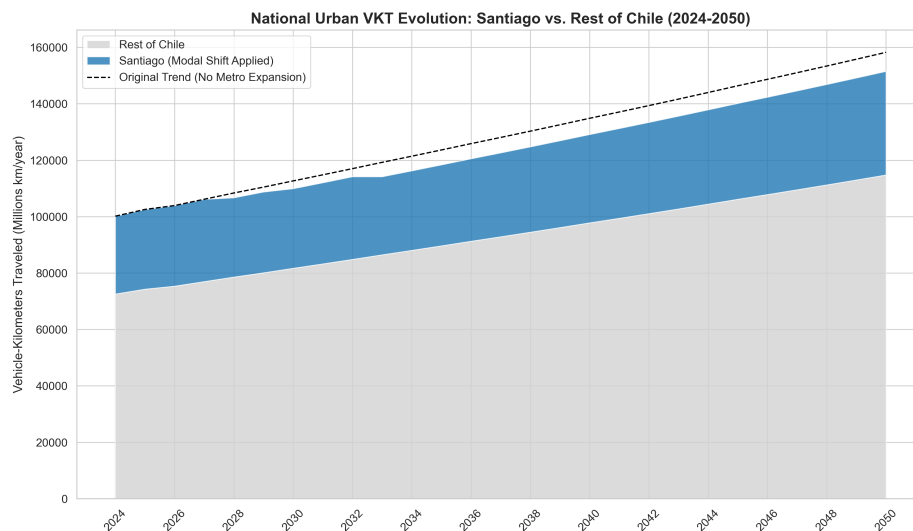


Figura 5.33: Evolución proyectada de los kilómetros recorridos (VKT) a nivel urbano. Se ilustra la brecha generada por el cambio modal en la Región Metropolitana frente al escenario inercial.

Bajar a las personas del automóvil particular tiene un correlato directo y cuantificable en la contabilidad de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el comportamiento de este beneficio ambiental no obedece a una curva suave. La mitigación ocurre de forma escalonada, respondiendo a la inauguración de los distintos tramos subterráneos. Las Figuras 5.34 y 5.35 ilustran esta dinámica estructural.

Al observar con detención las curvas, saltan a la vista incrementos bruscos en el ahorro de emisiones en torno a los años 2028 y 2032-2033, fechas que marcan hitos de inyección de aperturas de estaciones de metro, expansión del mismo y nueva oferta de transporte público. Un detalle técnico que llama profundamente la atención es el declive

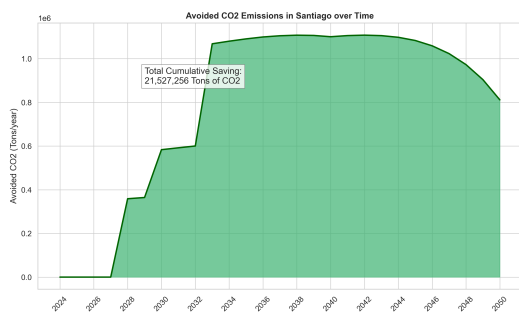


Figura 5.34: Trayectoria temporal de las emisiones de  $CO_2$  evitadas anualmente en Santiago, con un ahorro acumulado superior a 21,5 millones de toneladas.

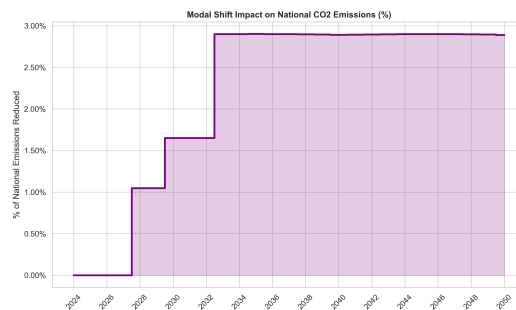


Figura 5.35: Impacto porcentual relativo del cambio modal sobre el inventario total de emisiones a nivel nacional.

paulatino que sufre la curva de toneladas absolutas evitadas (Figura 5.34) a medida que nos acercamos al año 2050.

Esta caída en la pendiente no sugiere bajo ningún punto de vista que el Metro esté perdiendo pasajeros. Más bien la explicación radica en la recomposición tecnológica de la matriz vehicular, ya que para la década del 2040, el parque automotor residual que circulará por las calles estará fuertemente electrificado y sujeto a normativas más estrictas (como Euro 7). Por ende, sacar un automóvil particular de circulación en 2048 "ahorra" marginalmente mucho menos dióxido de carbono que haberlo hecho en 2030. A pesar de este efecto de amortiguamiento, el proyecto por sí solo demuestra ser capaz de recortar de forma sostenida casi un 3 % del total nacional de emisiones (Figura 5.35), consolidándose como un pilar en los compromisos climáticos del país.

Finalmente, para comprender la naturaleza de este cambio, resulta esencial hacer un doble clic en la composición del parque para saber exactamente qué tipo de rodados estamos sacando de las calles.

El mapa de calor expuesto en la Figura 5.36 despeja las dudas al respecto. El color rojo oscuro domina por completo el estrato inferior correspondiente a los vehículos livianos de pasajeros (VLP) a partir de 2033. Esto ratifica que la columna vertebral de la rentabilidad social y ambiental del Metro radica en su capacidad de competir directamente y desincentivar el viaje en auto particular. Existe también un impacto colateral moderado, ilustrado en tonos anaranjados, sobre la actividad de los vehículos livianos comerciales (VLC), atribuible probablemente a una menor congestión que optimiza las rutas urbanas. Por el contrario, los modos de transporte menores, como las motocicletas (MOT), exhiben una respuesta casi nula a la expansión de la red, manteniendo intacta

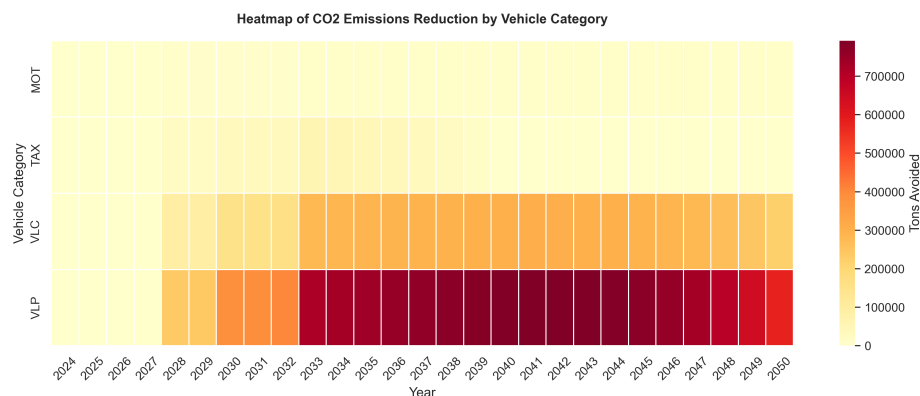


Figura 5.36: Mapa de calor que desglosa la intensidad de la reducción de emisiones de  $CO_2$  según la categoría de los vehículos desplazados.

su cuota de actividad dadas sus características operativas particulares.

Ahora bien, si estrechamos el foco hacia la matriz urbana de Santiago, el efecto de la red subterránea adquiere dimensiones mucho más influyentes. La inyección de capacidad de transporte que supondrán las futuras líneas 7, 8 y 9 no solo alivia la congestión superficial, sino que altera de raíz la curva de crecimiento de los viajes motorizados. Simulando esta apertura de las nuevas líneas de metro que están programadas para los próximos años, es que la Figura 5.37 retrata gráficamente esta divergencia. Mientras el escenario base postula un alza ininterrumpida que roza los 36.000 millones de kilómetros-vehículo anuales (VKT) para mediados de siglo, la incorporación de los nuevos trazados impacta y se materializa en quiebres profundos en la demanda. Se distinguen nítidamente los hundimientos en la curva punteada durante los años de apertura programada (2028, 2030 y el valle más pronunciado hacia 2032-2033), logrando anclar la carga vial en niveles sustancialmente inferiores a la tendencia inercial.

Traducir estos kilómetros que se dejan de conducir a su equivalente en gases de efecto invernadero revela el núcleo de la rentabilidad ambiental del proyecto. Para dimensionar la escala de este fenómeno en la capital, resulta bastante útil emparejar la métrica del tonelaje absoluto con su peso específico dentro del inventario de la ciudad.

Al revisar las métricas expuestas en las Figuras 5.38 y 5.39, notamos que en la contabilidad local, este cambio de hábito de los capitalinos logra amputar alrededor de un 16 % de la huella de carbono proyectada para el sistema de transporte terrestre de la ciudad.

Nuevamente nos topamos con el efecto de desgaste en la pendiente del gráfico absoluto hacia las postrimerías de la década del 2040. La penetración ineludible de la

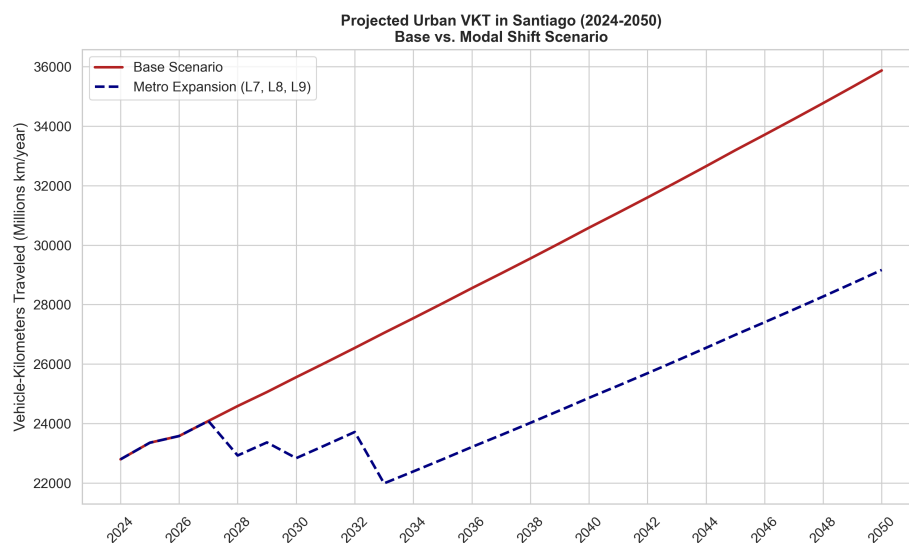


Figura 5.37: Proyección de kilómetros recorridos (VKT) en Santiago. Contraste entre el crecimiento orgánico del parque y el escenario de mitigación por la entrada de las nuevas líneas de Metro.

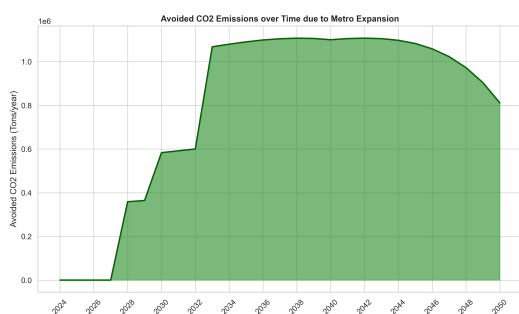


Figura 5.38: Volumen absoluto de emisiones de  $CO_2$  evitadas anualmente producto de la expansión del Metro.

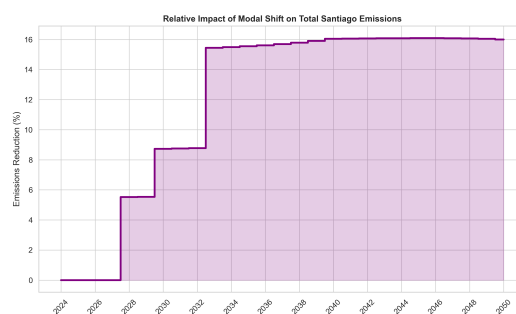


Figura 5.39: Reducción relativa del  $CO_2$ , alcanzando cerca del 16 % del total de emisiones proyectadas para Santiago.

electromovilidad y normativas más estrictas en la flota circulante hace que, paradójicamente, evitar un viaje en automóvil en algún año sobre el 2040 reporte un menor <sup>a</sup>horroclimático que ese mismo viaje evitado en 2030, dada las mismas razones expuestas y explicadas con anterioridad, ya que los autos del futuro, derechamente, serán más limpios. Para cerrar la radiografía de este traspaso modal, es fundamental identificar el origen exacto del alivio ambiental, es decir, qué tipo de vehículos estamos sacando efectivamente de circulación. Tomando una fotografía del año 2035, momento en que la nueva infraestructura operará a plenitud, se disipa cualquier ambigüedad técnica al respecto.

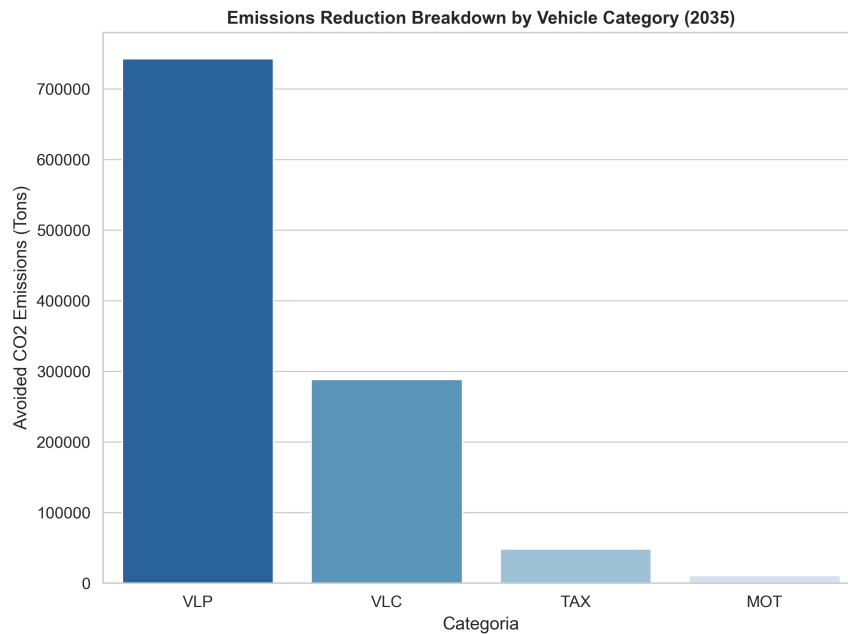


Figura 5.40: Desglose de la reducción de emisiones por categoría vehicular en Santiago, hito año 2035.

La Figura 5.40 demuestra que el grueso del carbono mitigado, que supera con holgura las 700.000 toneladas, proviene de los vehículos livianos de pasajeros (VLP). Esto confirma con base empírica que el trazado subterráneo posee las características necesarias de rapidez y capilaridad para competir contra el uso del automóvil particular en el día a día. El segmento comercial liviano (VLC) aporta el segundo bloque en importancia, situándose por debajo de las 300.000 toneladas, el cual corresponde a un beneficio en gran medida producto de la optimización operativa propiciada por calles menos saturadas. Por su parte, la incidencia sobre las externalidades de taxis (TAX) y

motocicletas (MOT) se mantiene en rangos marginales respecto al consolidado urbano.

## 5.2. Transporte Marítimo

Ahora en cuanto a la proyección de emisiones del transporte marítimo bajo distintos escenarios de mitigación, se tiene en primera instancia que para realizar esto se ha empleado toda la metodología, todas las formulas y relaciones econométricas y termodinámicas explicadas anteriormente en la sección de metodología de la simulación de emisiones futuras del transporte marítimo, en donde se han planteado todos los escenarios simulados, como se han abordado y cuantificado cada uno de esos escenarios en función de los contaminantes analizados y los factores de emisión de estos contaminantes provenientes del proceso termodinámico de combustión y la estequiometría de los combustibles analizados. Para evaluar correctamente el impacto ambiental del rubro naviero a largo plazo, este exige un soporte analítico capaz de procesar múltiples variables y horizontes regulatorios de manera simultánea. Para abandonar la rigidez de las planillas de cálculo estáticas, se construyó un entorno de inteligencia de negocios mediante un *dashboard* interactivo. Esta plataforma permite navegar por la trayectoria proyectada del sector hasta el año 2050, sometiendo el inventario base a un abanico de escenarios de mitigación que alteran drásticamente el rumbo de la contaminación.

Las Figuras 5.41 y 5.42 capturan la esencia operativa de esta herramienta. Al simular el comportamiento de gases críticos como los Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) bajo distintas sendas de política pública, la divergencia entre los modelos salta a la vista de inmediato.

Un escenario inercial o *Business As Usual* (representado por la curva E0) condena al sistema a un crecimiento sostenido de la carga tóxica, empujado de forma natural por el aumento vegetativo del comercio exterior y el mayor tonelaje de transferencia. En abierta contrapartida, la inyección de restricciones tecnológicas progresivas (escenarios E3 en adelante) demuestra tener la fuerza suficiente para doblegar esta inercia, forzando un desplome abrupto del volumen de contaminantes hacia la mitad del siglo.

Sin embargo, el problema climático derivado de los buques no flota en el vacío, ya que este posee anclajes territoriales extremadamente bien definidos. Comprender a nivel país hacia dónde se dirigen estas toneladas de gases requiere aterrizar la macrocifra en la infraestructura portuaria real.

La Figura 5.43 mapea y jerarquiza esta presión ambiental, revelando que el estrés logístico recae con una asimetría brutal sobre un puñado de comunas costeras. Termi-



Figura 5.41: Panel de proyección temporal comparando el escenario inercial (E0) frente a las sendas de mitigación (E1 a E5). Se observa el punto de quiebre estructural en la curva de emisiones al aplicar regulaciones estrictas.

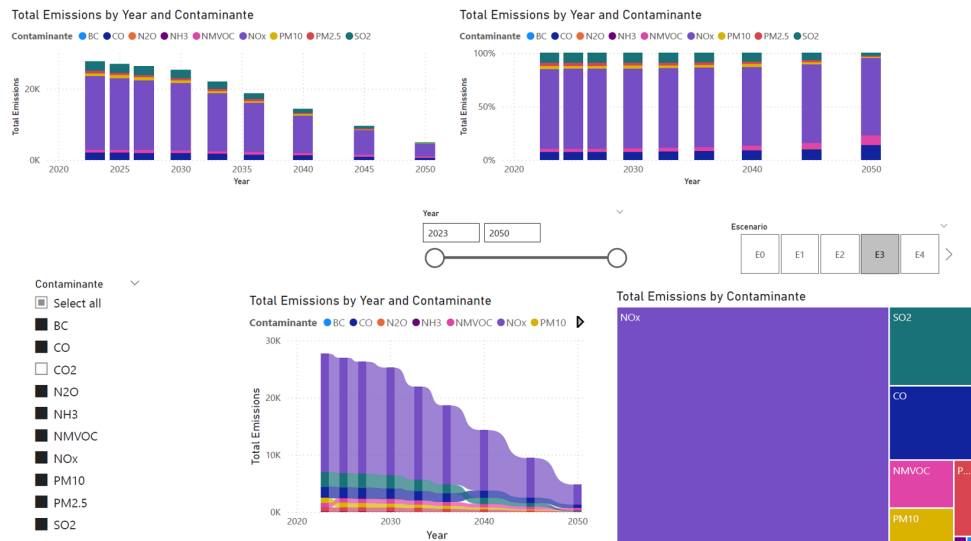


Figura 5.42: Desglose proporcional y absoluto por tipo de contaminante a lo largo del periodo modelado, desnudando la persistencia estructural de gases como el  $SO_2$  y el  $NO_x$  en la matriz naviera.

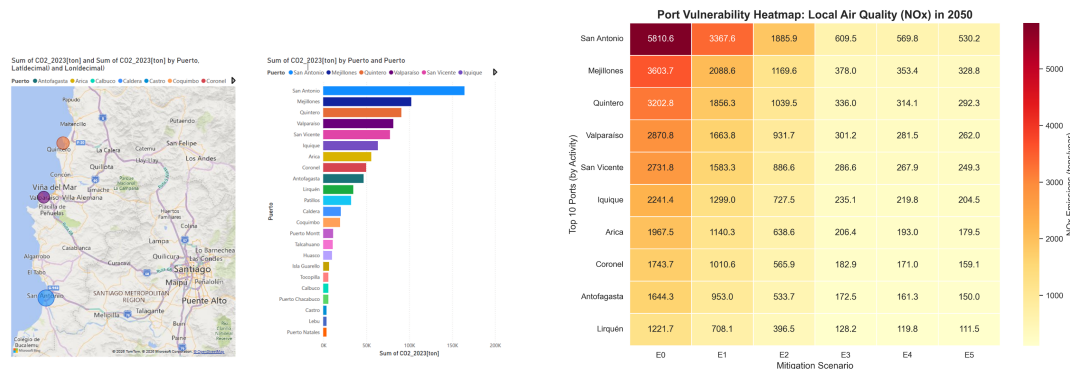


Figura 5.43: Jerarquización territorial de la huella de carbono marítima, exponiendo a San Antonio y Mejillones como los focos primarios de tensión logística.

Figura 5.44: Matriz de vulnerabilidad local al 2050. Ilustra cómo la agresividad de cada escenario de mitigación logra (o fracasa en) apagar los puntos calientes de  $NO_x$  en los puertos críticos.

nales como San Antonio, Mejillones y Quintero irrumpen en la gráfica absorbiendo una cuota completamente desproporcionada de la contaminación a nivel nacional.

Para afinar el diagnóstico sobre el futuro de la calidad del aire local en estas denominadas zonas de sacrificio logístico, se elaboró una matriz térmica de vulnerabilidad (Figura 5.44). Este cruce de datos enfrenta directamente a los diez puertos más transitados contra la paleta de escenarios de mitigación proyectados para 2050. El resultado es revelador y evidencia que perpetuar las reglas operativas actuales mantendrá encendida una alerta roja de toxicidad sobre los grandes complejos portuarios, y que solo la adopción temprana de las trayectorias regulatorias más estrictas resulta capaz de diluir la asfixia atmosférica, llevando las emisiones de  $NO_x$  a umbrales de tolerancia que aseguren un respiro real para los ecosistemas urbanos aledaños.

### 5.2.1. Resultados de la Proyección de Emisiones del Transporte Marítimo

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los modelos generados y parametrizados para la correcta modelación y cuantificación de emisiones para el transporte marítimo nacional en el horizonte proyectado hacia 2050. El análisis abarca tanto Gases de Efecto Invernadero (GEI) como contaminantes climáticos de vida corta y precursores de la calidad del aire local, evaluados bajo los seis escenarios de mitigación descritos en la metodología.



A nivel general, las trayectorias evidencian el progresivo desacople entre el crecimiento de la actividad marítima y las emisiones atmosféricas. Mientras el escenario de línea base (E0) muestra un crecimiento sostenido impulsado directamente por el aumento de la demanda (alcanzando su *peak* en 2050), los escenarios alternativos demuestran que las medidas de eficiencia operativa logran estabilizar la curva, y la transición hacia combustibles de bajo o nulo carbono (E2 a E5) es capaz de revertir la tendencia, generando reducciones absolutas significativas. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) representa el principal desafío en la descarbonización del sector. Como se observa en la figura 5.45, en ausencia de medidas adicionales (E0), las emisiones superan los 1,4 millones de toneladas hacia 2050. La penetración de GNL (E2) ofrece una reducción moderada, pero son los escenarios E3, E4 y E5 los que logran una caída drástica. Por su parte, el Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) exhibe un comportamiento particular (figura 5.46), agrupándose estrechamente en una suave tendencia a la baja, lo que indica que persisten emisiones residuales independientemente de la transición energética.

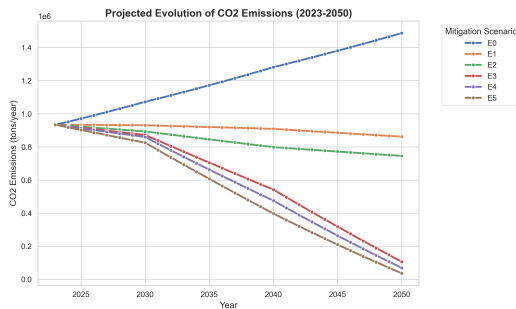


Figura 5.45: Evolución proyectada de CO<sub>2</sub>. Se evidencia fuerte divergencia por combustibles alternativos.

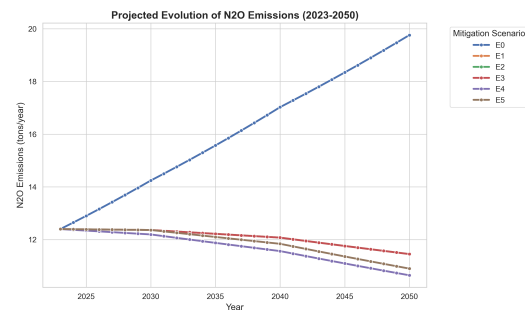


Figura 5.46: Trayectorias de emisión de N<sub>2</sub>O. Menor dispersión frente a otros GEI.

Por su parte, los óxidos de azufre y nitrógeno son críticos para la calidad del aire local en zonas costeras, es por este motivo que la figura 5.47 ilustra cómo el escenario E2 (GNL) genera una caída abrupta y temprana en el SO<sub>2</sub>. En el caso de los NO<sub>x</sub> (figura 5.48), la reducción también es sustancial, descendiendo a niveles mínimos en los escenarios E3-E5 gracias a tecnologías de propulsión y sistemas de postratamiento de nueva generación.

Asimismo, el PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> siguen trayectorias directamente ligadas a la calidad del carburante utilizado. Las figuras 5.49 y 5.50 demuestran que reemplazar combustibles pesados reduce las partículas a niveles marginales. Adicionalmente, el Carbono Negro (figura 5.51) aporta beneficios climáticos y de salud inmediatos con su mitigación

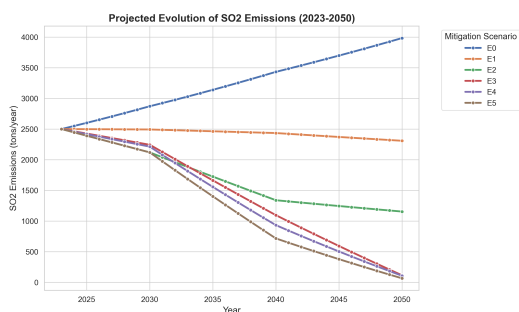


Figura 5.47: Emisiones de SO<sub>2</sub>. Reducciones casi totales hacia 2050 por adopción de combustibles limpios.

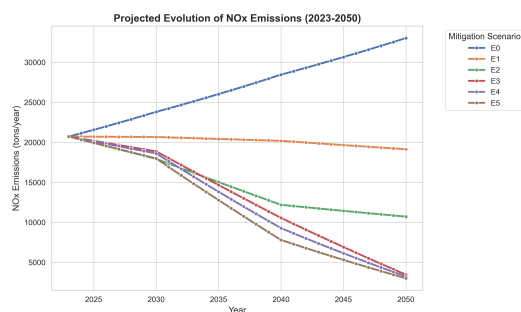


Figura 5.48: Evolución de NO<sub>x</sub>. Quiebre de tendencia desde 2030 en descarbonización profunda.

temprana en los escenarios E4 y E5.

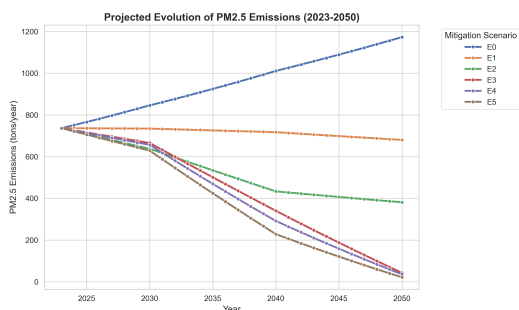


Figura 5.49: Proyección de PM<sub>2.5</sub>. Erradicación virtual bajo los escenarios de combustibles cero GEI.

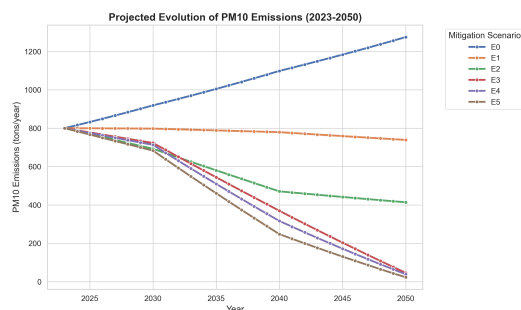


Figura 5.50: Emisiones de PM<sub>10</sub>. Tendencia decreciente análoga a la reducción de partículas finas.

En cuanto a los Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos (NMVOC, figura 5.53), se aprecia que el GNL (E2) presenta reducciones más conservadoras, fenómeno asociado al deslizamiento de hidrocarburos (*slip*) característico de los motores a gas. Finalmente, las emisiones de amoníaco (figura 5.54) caen de forma general, pero requerirán un control exhaustivo (*ammonia slip catalysts*) a medida que el e-NH<sub>3</sub> escale como propulsor principal en los modelos más ambiciosos.

Ahora para dimensionar el impacto real de las distintas estrategias de descarbonización sobre la atmósfera, es fundamental analizar el presupuesto acumulado de emisiones para el periodo completo (2023-2050). Mientras que las trayectorias anuales ilustran la velocidad de la transición, el presupuesto total (*cumulative budget*) cuantifica la masa contaminante definitiva que ingresará al medioambiente bajo las condiciones de cada escenario. Esta métrica es el principal indicador de éxito en las normativas internaciona-

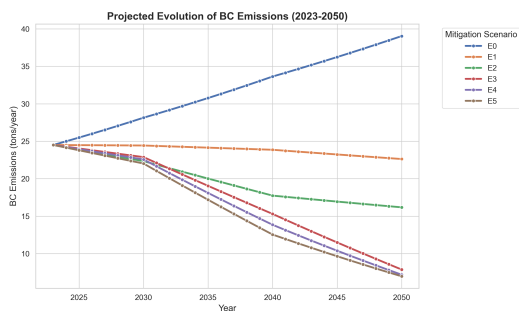


Figura 5.51: Evolución de Carbono Negro (BC). Su reducción acompaña la eliminación de combustibles pesados.

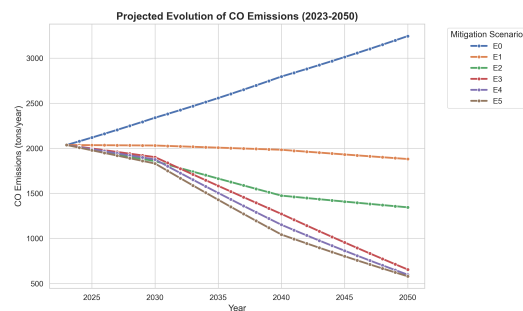


Figura 5.52: Emisiones de Monóxido de Carbono (CO). Caída sustancial por mayor eficiencia térmica.

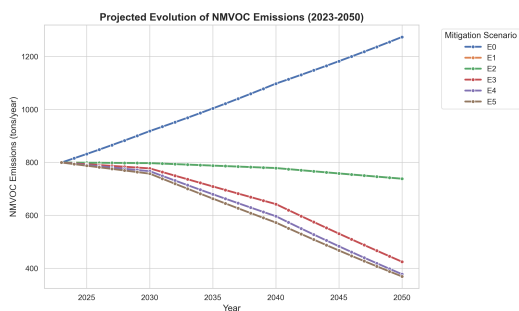


Figura 5.53: Evolución de NMVOC. Se aprecian las limitaciones del GNL por deslizamiento de metano.

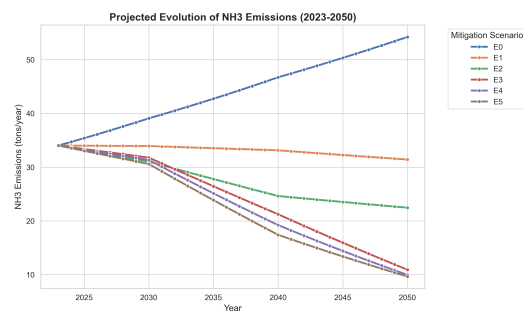


Figura 5.54: Emisiones de NH3. Requerirán monitoreo estricto ante el futuro uso de amoníaco verde.

les sobre el cambio climático, dado que el forzamiento radiativo depende directamente de la acumulación histórica de gases. Es por este motivo que se presenta el inventario de Dióxido de Carbono (figura 5.55), el cual revela que mantener el status quo (E0) agota un presupuesto de 32,6 millones de toneladas (Mt) hacia mediados de siglo. La sola implementación de las medidas operacionales vigentes (E1) logra contraer este total a 24,6 Mt. Sin embargo, para alinear al sector con los objetivos de la OMI y el Acuerdo de París, se hace indispensable la transición materializada en los escenarios E4 y E5, los cuales limitan el presupuesto a 15,6 Mt y 14,4 Mt, respectivamente. En contraste, el Óxido Nitroso (figura 5.56) exhibe una inflexibilidad técnica notable, ya que si bien se observa que el escenario E0 acumula 432,8 toneladas, las opciones de mitigación (E1 a E5) se estancan en un rango de 315 a 326 toneladas, demostrando que la erradicación total de este GEI es altamente compleja y persiste como un residuo inercial inherente a los procesos térmicos de propulsión, independientemente de la renovación de la matriz de combustibles.

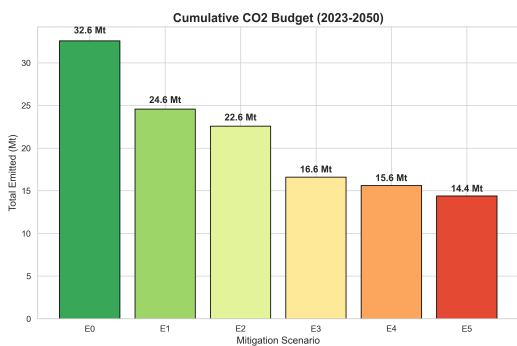


Figura 5.55: Presupuesto acumulado de CO<sub>2</sub>. Los escenarios E4 y E5 logran reducir el inventario a menos de la mitad respecto a la línea base.

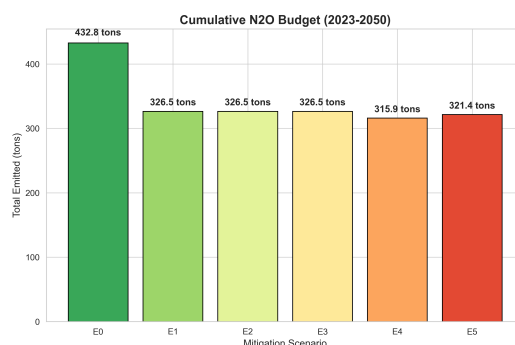


Figura 5.56: Masa total emitida de N<sub>2</sub>O. Se observa un límite estructural a la mitigación entre los escenarios alternativos.

Por su parte el impacto acumulado de los óxidos de azufre y nitrógeno define la degradación a largo plazo de la calidad del aire costero. Como se detalla en la figura 5.57, el reemplazo del VLSFO disminuye progresivamente la carga de SO<sub>2</sub> desde 87,2 kt en el caso base a un piso de 34,1 kt en el escenario E5. De igual forma, el presupuesto de NO<sub>x</sub> (figura 5.58) se ve sometido a una contracción estructural drástica en donde decae de 723,2 kt a 317,3 kt bajo el escenario de mayor ambición climática, reflejando el efecto compuesto de menor consumo energético y el uso de combustibles refinados no fósiles.

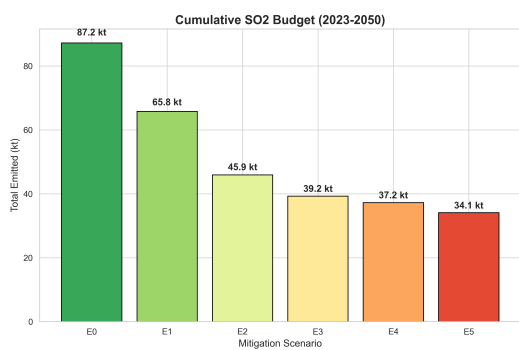


Figura 5.57: Presupuesto acumulado de SO<sub>2</sub>. La contracción del inventario es proporcional a la eliminación de derivados pesados del petróleo.

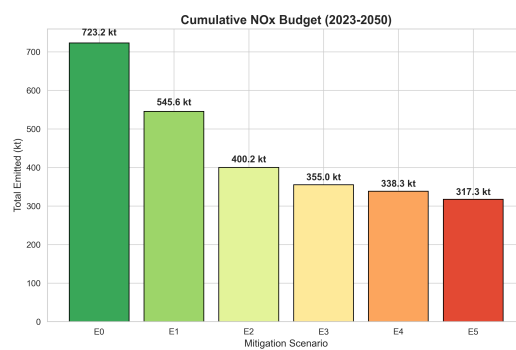


Figura 5.58: Masa total emitida de NO<sub>x</sub>, evidenciando una caída superior al 50 % entre el escenario de inacción (E0) y Chile Acelerado (E5).

El comportamiento acumulado del material particulado fino y grueso (figuras 5.59 y 5.60) es virtualmente análogo, dado que el PM<sub>2.5</sub> total se reduce de 25,7 kt a 10,3 kt, mientras el PM<sub>10</sub> desciende de 27,9 kt a 11,1 kt. Esta disminución de más del 50 % en el inventario de partículas representa un alivio directo en la carga de morbilidad atribuible a la actividad portuaria a lo largo de las próximas décadas. Por su parte, el Carbono Negro (figura 5.61) contrae su masa acumulada de 855 a 432,1 toneladas. Al ser un agente de alto forzamiento radiativo y rápida deposición, esta limitación presupuestaria previene alteraciones a corto plazo en el albedo de ecosistemas sensibles como los glaciares patagónicos, por donde transitan rutas de cabotaje naviero.

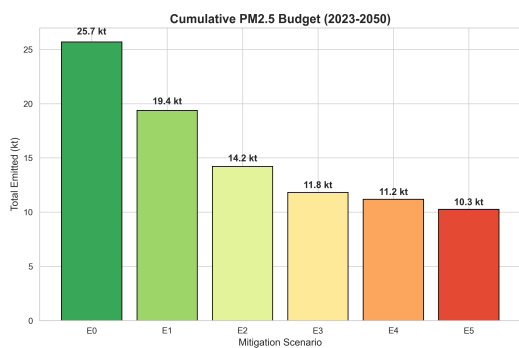


Figura 5.59: Presupuesto acumulado de PM<sub>2.5</sub>. Refleja la limitación total de partículas respirables vertidas al ambiente.

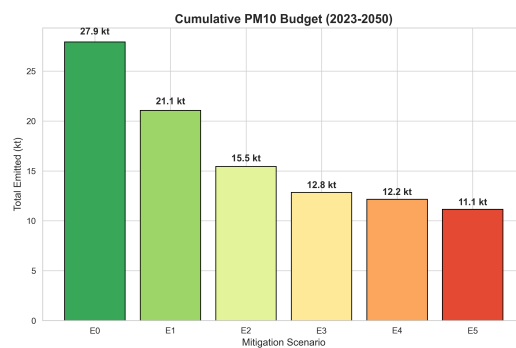


Figura 5.60: Masa total emitida de PM<sub>10</sub>, mostrando una tendencia congruente con la contracción de la fracción fina.

Ahora bien, el análisis de compuestos orgánicos e hidrocarburos revela dinámicas particulares en función de la matriz tecnológica. En la figura 5.63, se observa que

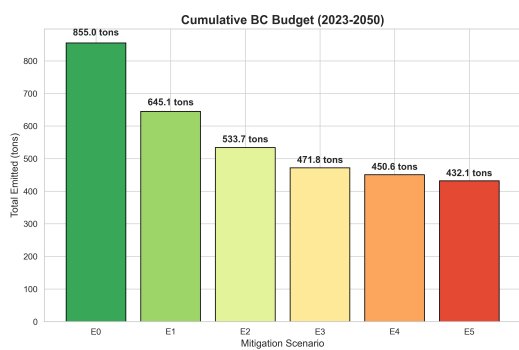


Figura 5.61: Inventario de emisiones de Carbono Negro (BC). El presupuesto se restringe casi a la mitad en los escenarios óptimos.

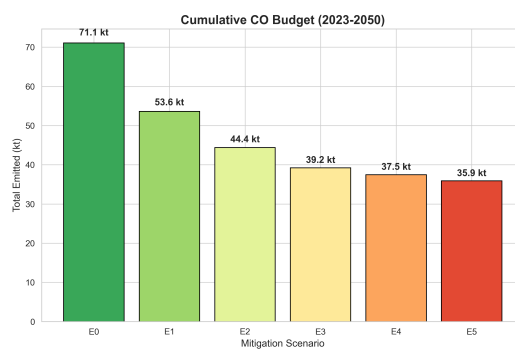


Figura 5.62: Presupuesto de Monóxido de Carbono (CO). Su mitigación se alinea con la mayor eficiencia térmica de las nuevas plantas motrices.

los NMVOC descienden de 27,9 kt a 16,8 kt en el periodo. Un aspecto técnico a destacar es el estancamiento entre los escenarios E1 y E2 (ambos reportan 21,0 kt acumuladas). Esto se explica por las pérdidas y el deslizamiento de metano en los primeros años de penetración de motores GNL (E2), lo que anula temporalmente la mejora presupuestaria frente a un escenario que usa VLSFO pero con alta eficiencia operativa (E1). Finalmente, la carga base acumulada de amoníaco (figura 5.64) cae de 1.187,5 a 600,1 toneladas. Esta reducción consolida la línea base futura sobre la cual deberá evaluarse rigurosamente el impacto neto de introducir e-NH3 a gran escala como vector energético en la última década del modelo (2040-2050).

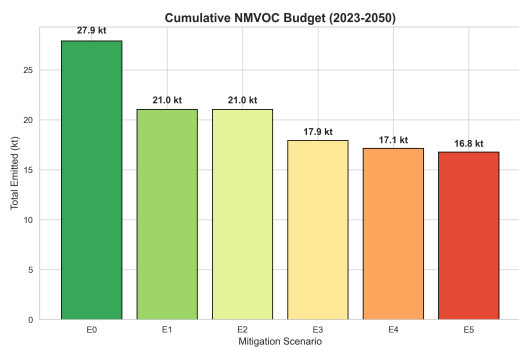


Figura 5.63: Inventario de NMVOC. Se evidencia el efecto de estancamiento en E2, producto de las pérdidas operativas de gas.

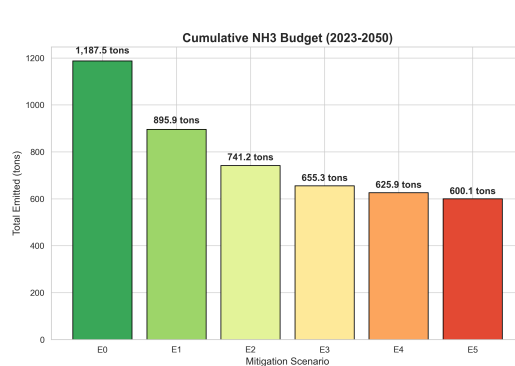


Figura 5.64: Presupuesto total de NH3 emitido previo a la adopción generalizada del amoníaco verde como combustible.

Por último se tiene que más allá de analizar las trayectorias anuales, al igual que

lo realizado y expuesto anteriormente para el transporte terrestre, el verdadero impacto ambiental y climático de las políticas de descarbonización se evalúa cuantificando la masa total de contaminantes que se deja de emitir a la atmósfera. A este concepto se le conoce como *brecha de mitigación* o *mitigation wedge*, representada gráficamente por el área comprendida entre la curva del escenario de inacción o línea base (E0) y la trayectoria de máxima ambición tecnológica (E5 - Chile Acelerado). A continuación, se presentan las emisiones acumuladas evitadas para el periodo 2023-2050, desglosadas por contaminante. Esta métrica es crucial, ya que ilustra el beneficio ambiental neto de la transición tecnológica de la flota.

El volumen más significativo de mitigación recae sobre el Dióxido de Carbono. Como ilustra la figura 5.65, la aplicación de las medidas del escenario E5 permitiría evitar la emisión de 18,2 millones de toneladas (Mt) de CO<sub>2</sub> acumuladas hacia 2050. Esta cifra subraya el enorme peso que tiene el sector marítimo en el inventario nacional de GEI y el potencial del e-metanol y el amoniaco verde para descarbonizar la cadena logística. En contraste, la mitigación acumulada de Óxido Nitroso (figura 5.66) es de 111,4 toneladas, una cifra proporcionalmente menor, pero de igual manera bastante relevante dado el altísimo potencial de calentamiento global (GWP) de este gas.

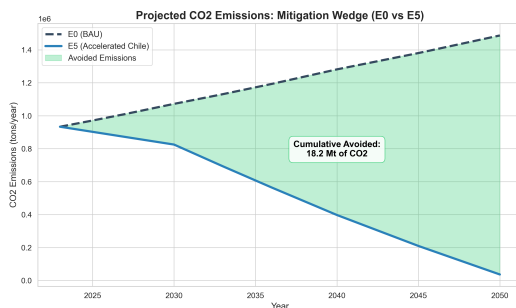


Figura 5.65: Brecha de mitigación para CO<sub>2</sub>.

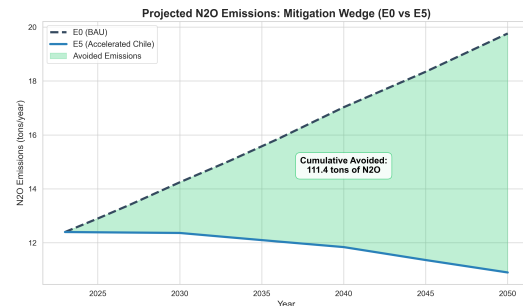


Figura 5.66: Emisiones evitadas de N<sub>2</sub>O (111,4 toneladas). El área refleja un beneficio modesto pero sostenido a largo plazo.

Se sabe que los mayores beneficios para la salud pública de las comunidades portuarias y costeras se evidencian en la reducción de los precursores de esmog y acidificación. Es en este sentido, que se expone que la eliminación del VLSFO y otros petróleos residuales evitaría la liberación de 53.137,1 toneladas de SO<sub>2</sub> (figura 5.67) y una impactante suma de 405.947,9 toneladas de NO<sub>x</sub> (figura 5.68). Esta drástica reducción en NO<sub>x</sub> es producto directo de la introducción de nuevas tecnologías de combustión cero-GEI y exigentes sistemas de reducción catalítica.

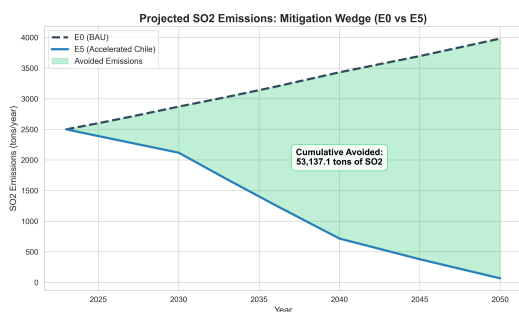


Figura 5.67: Emisiones acumuladas evitadas de SO<sub>2</sub>. Beneficio directo de la transición hacia vectores energéticos libres de azufre.

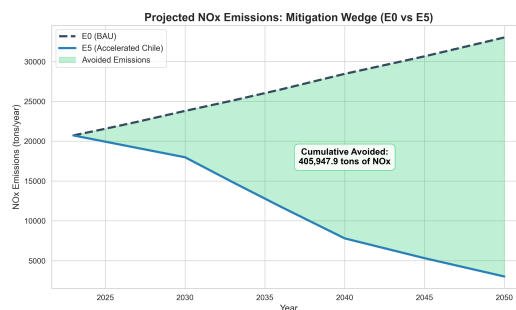


Figura 5.68: Brecha de mitigación para NO<sub>x</sub>. Destaca la notable cifra de más de 405 mil toneladas evitadas.

En la misma línea, el impacto sobre el material particulado respirable y fino es sustancial. Las figuras 5.69 y 5.70 revelan que el escenario simulado 'Chile Acelerado' previene la emisión de 15.440,1 toneladas de PM<sub>2.5</sub> y 16.779,9 toneladas de PM<sub>10</sub>. Dado que estas partículas están vinculadas a afecciones cardiopulmonares, esta brecha de mitigación se traduce directamente en externalidades positivas en salud, disminuyendo los costos sanitarios asociados al tráfico marítimo cercano a la costa.

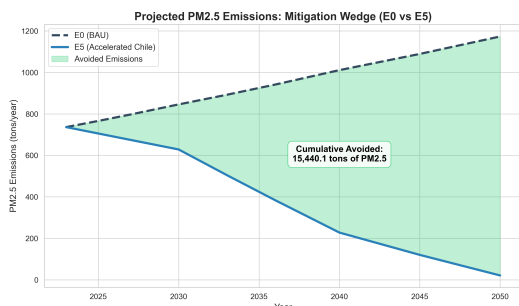


Figura 5.69: Mitigación acumulada de PM<sub>2.5</sub>. Se previenen más de 15.400 toneladas de partículas finas altamente nocivas.

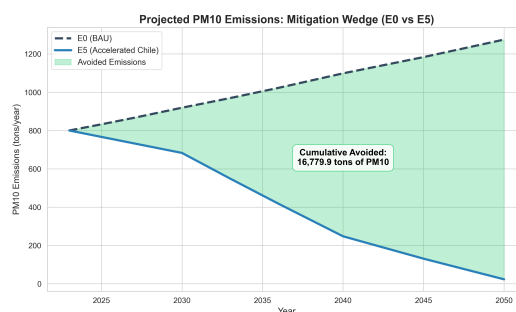


Figura 5.70: Brecha de mitigación para PM<sub>10</sub>, mostrando un beneficio acumulado de 16.779,9 toneladas.

El Carbono Negro (BC) por su parte, el cual recordemos que es un potente forzante climático de vida corta que se ha analizado en profundidad a lo largo de este estudio e investigación, acumula 423 toneladas evitadas en el periodo (figura 5.71). Paralelamente, la optimización de la eficiencia térmica y el cambio de ciclo de los motores resultan en la prevención de 35.163,2 toneladas de Monóxido de Carbono (figura 5.72).



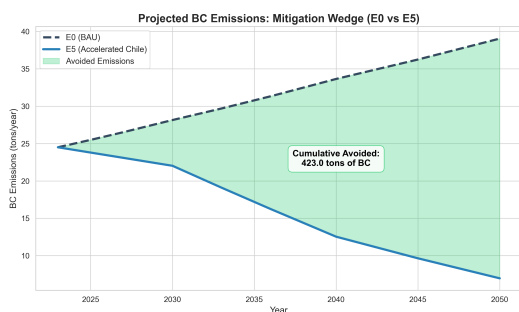


Figura 5.71: Emisiones evitadas de Carbono Negro (BC), fundamentales para atenuar el forzamiento radiativo local.

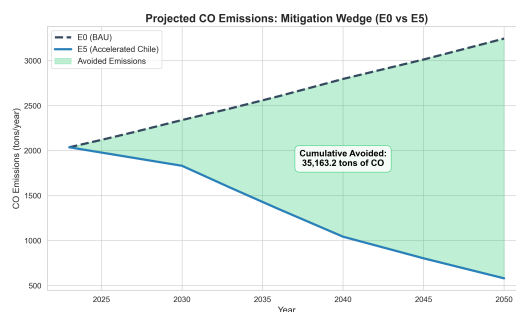


Figura 5.72: Brecha de mitigación para CO. El incremento en la calidad de combustión evita más de 35 mil toneladas.

Finalmente, las figuras 5.73 y 5.74 caracterizan las emisiones asociadas a hidrocarburos no metánicos y amoníaco, respectivamente. Se logra evitar la emisión de 11.122,7 toneladas de NMVOC al reducir la dependencia de combustibles fósiles tradicionales y minimizar las fugas de evaporación. En cuanto al NH<sub>3</sub>, la mitigación aparente de 587,4 toneladas refleja la diferencia neta frente a la línea base, sin embargo, como se discutió previamente, es importante destacar que la introducción futura de amoníaco verde forzarán a la industria a mantener altos estándares tecnológicos para asegurar que esta brecha no se reduzca a causa del escape de combustible crudo (*ammonia slip*).

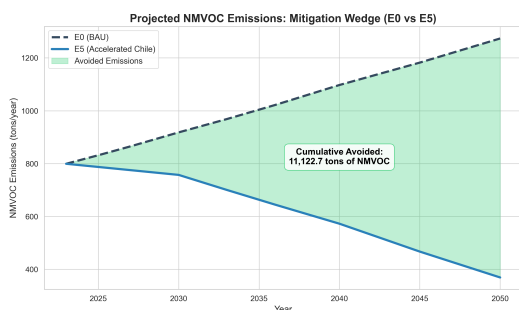


Figura 5.73: Emisiones acumuladas evitadas de NMVOC (11.122,7 toneladas) en la transición 2023-2050.

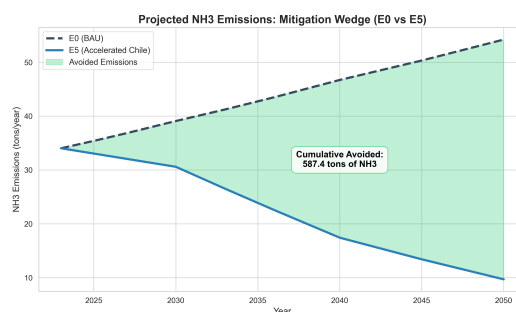


Figura 5.74: Brecha de mitigación para NH<sub>3</sub>. Representa la disminución base previo a la masificación del amoníaco como combustible marino.

## 5.2.2. Evaluación Sistémica y Descomposición Estratégica

Tras cuantificar las trayectorias y los presupuestos acumulados de los distintos contaminantes, resulta fundamental e indispensable realizar una evaluación integradora

que permita visualizar los compromisos tecnológicos (*trade-offs*), desglosar el peso relativo de cada una de las medidas de mitigación simuladas y espacializar el impacto en el territorio nacional. La adopción de tecnologías de propulsión de cero o bajo carbono no es inocua en su totalidad, y por lo mismo, resulta esencial tener esto en consideración para evaluar el desempeño ambiental de forma holística. La figura 5.75 presenta una normalización de la canasta de contaminantes proyectados al 2050, utilizando el escenario de línea base (E0) como el 100 % del impacto sistémico.

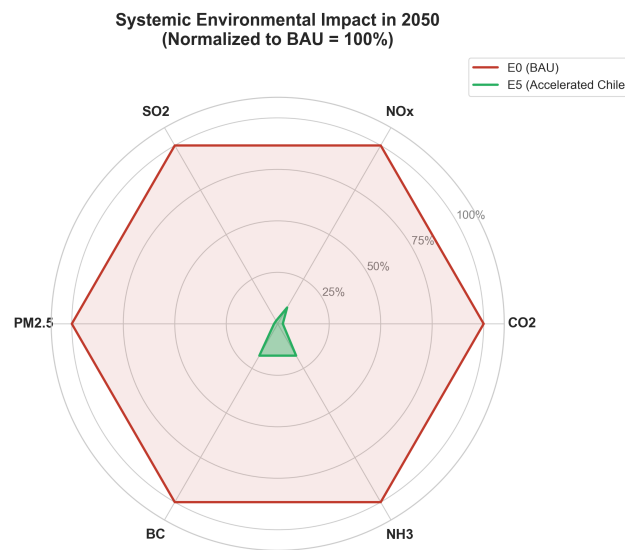


Figura 5.75: Evaluación multidimensional del impacto ambiental al 2050. El escenario Chile Acelerado (E5) contrae casi por completo la huella de GEI y contaminantes criterio.

El gráfico de radar evidencia la profunda contracción sistémica de la huella ambiental del sector marítimo bajo el escenario Chile Acelerado (E5) simulado y explicado detalladamente en secciones anteriores. Variables críticas como el CO2, el Material Particulado (PM2.5), el Carbono Negro (BC) y los óxidos de azufre y nitrógeno convergen hacia el centro del polígono, representando reducciones que superan el 90 % respecto al escenario inercial. No obstante, el análisis revela una deformación del área verde en el eje del amoníaco (NH3). Esta asimetría ilustra gráficamente el *trade-off* central de la transición energética modelada, dada por la drástica descarbonización basada en vectores sintéticos como el e-NH3 introduce una mayor vulnerabilidad ante posibles fugas y emisiones residuales de amoníaco, obligando a priorizar sistemas de reducción

catalítica (SCR) especializados en la flota del futuro.

Ahora bien, para comprender la arquitectura técnica detrás de esta descarbonización, es necesario cuantificar la contribución individual de cada pilar estratégico analizado. La figura 5.76 descompone la brecha de mitigación de CO<sub>2</sub> esperada para el año 2050 mediante un análisis de cascada.

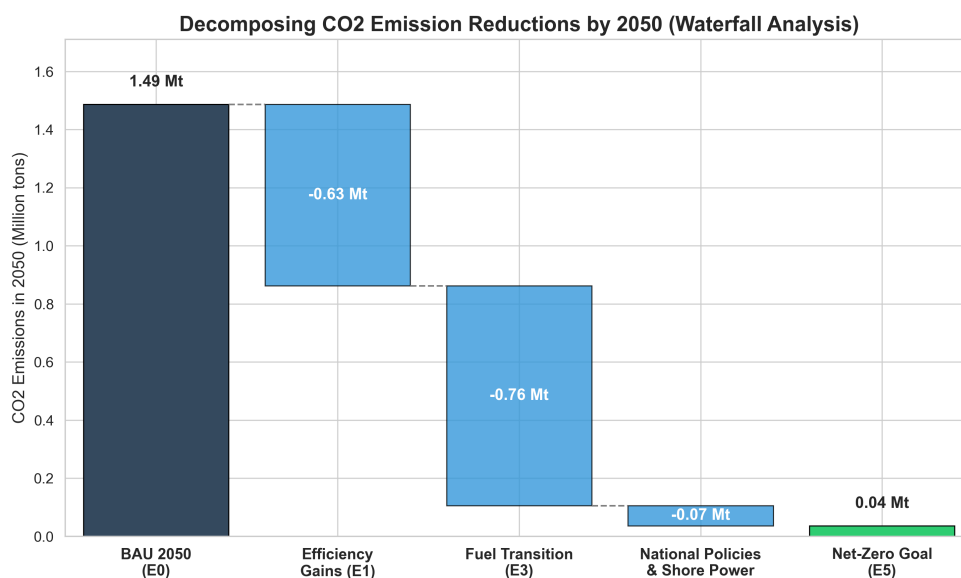


Figura 5.76: Análisis de cascada para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al 2050. Se detalla el peso relativo de la eficiencia, la transición energética y las políticas locales para alcanzar el objetivo Net-Zero.

Partiendo de una línea base proyectada de 1,49 millones de toneladas (Mt) bajo el escenario E0, la gráfica demuestra que la transición no depende de una solución única. Las mejoras en eficiencia operativa, diseño hidrodinámico y la electrificación de los muelles (*Cold Ironing* o *Shore Power*) (asimilables al salto del E0 al E1) asumen una carga fundamental, eliminando 0,63 Mt del sistema. Sobre esta base optimizada, el cambio hacia combustibles sintéticos y limpios (escenarios de transición, E3) aporta la mayor fracción de reducción absoluta, mitigando 0,76 Mt adicionales. Finalmente, las políticas locales aceleradas aportan las 0,07 Mt finales requeridas para abatir el remanente, logrando un escenario casi neutral (*Net-Zero*) con apenas 0,04 Mt de CO<sub>2</sub> de origen marítimo a nivel nacional.

Finalmente, a nivel territorial, el impacto del transporte marítimo exhibe una alta concentración espacial. Dado que los buques operan en régimen auxiliar y de maniobra en las cercanías de las costas como se mostrado y explicado con anterioridad, contami-

nantes como los óxidos de nitrógeno (NOx) repercuten directamente sobre la salud de las poblaciones aledañas a los complejos portuarios.

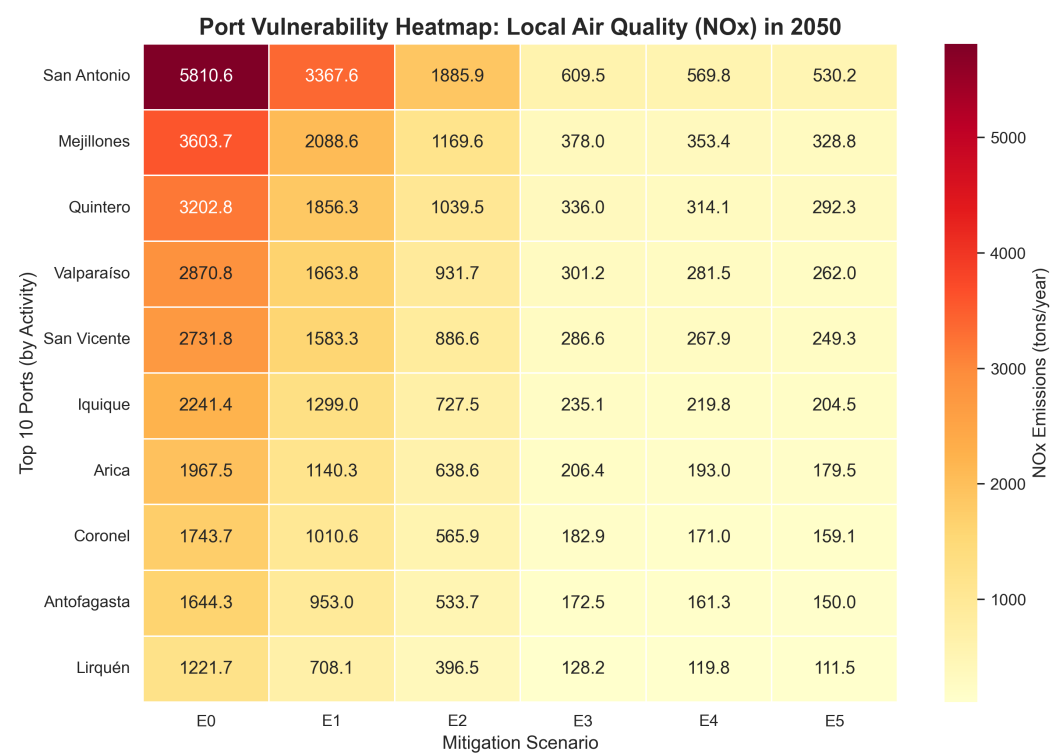


Figura 5.77: Matriz de calor de la vulnerabilidad por emisiones locales de NOx en los diez principales puertos chilenos al 2050. La intensidad del color refleja la concentración de externalidades negativas bajo escenarios de inacción.

La matriz de calor (*heatmap*) presentada en la figura 5.77 distribuye las proyecciones de NOx entre los diez puertos de mayor actividad del país. El análisis del eje vertical (E0) revela un panorama de alta vulnerabilidad ambiental concentrado en la zona central y norte, ya que se puede observar e inferir claramente que el puerto de San Antonio asume la posición más crítica con más de 5.800 toneladas proyectadas al año, seguido por los enclaves industriales e intermodales de Mejillones y Quintero (3.603 y 3.202 toneladas, respectivamente).La evolución horizontal a través de los escenarios de mitigación demuestra cómo la adopción de tecnologías limpias (E3, E4 y E5) no solo reduce la emisión agregada a nivel país, sino que tiene un efecto democratizador sobre el territorio. Bajo el escenario optimista y ambicioso E5, la matriz cromática se homogeniza hacia niveles de bajo impacto, aliviando la carga tóxica en las llamadas "zonas de sacrificio". En San Antonio, por ejemplo, las emisiones de NOx se desploman

de 5.810 a apenas 530,2 toneladas, demostrando que la descarbonización marítima global conlleva un co-beneficio inmediato y sustancial para la calidad del aire a nivel comunal.

### 5.3. Transporte Aéreo

El transporte aéreo por su parte presenta un desafío de descarbonización particularmente complejo debido a la inelástica dependencia de sus operaciones respecto a los combustibles líquidos de alta densidad energética y a sus proyectadas tasas de crecimiento de demanda. Para cuantificar la magnitud de este reto, y al igual que lo realizado con los otros medios de transporte, se construyeron modelos de proyección al año 2050 evaluando el comportamiento del parque aeronáutico bajo un escenario inercial (BAU) y contrastándolo contra diversas sendas de mitigación. Es en este sentido que se presenta la Figura 5.78, la cual expone la evolución del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) bajo estas distintas políticas. Se puede observar que la curva negra del escenario base advierte una escalada preocupante, empujándose hasta rozar los 14 millones de toneladas (Mt) anuales para mediados de siglo. Frente a esto, las estrategias de mitigación logran abrir una brecha cada vez más profunda. Esta zona de ahorro, o cuña de mitigación, se grafica con detalle en la Figura 5.79, donde el modelo más ambicioso llega a acumular un total de 83,8 Mt de  $CO_2$  evitadas a lo largo de todo el horizonte de evaluación.

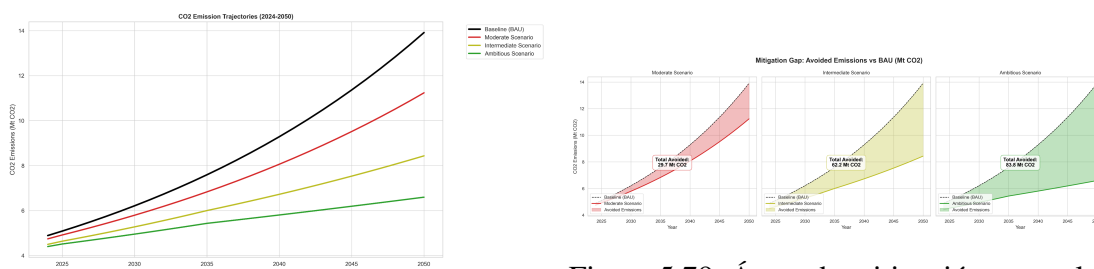


Figura 5.78: Trayectorias de emisión de  $CO_2$  (2024-2050). Se observa la divergencia entre el escenario base y las distintas alternativas de intervención.

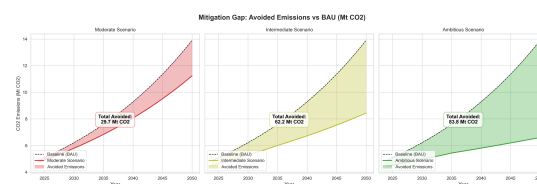


Figura 5.79: Áreas de mitigación acumulada. El escenario ambicioso logra suprimir más de 83 millones de toneladas respecto a la línea base.

Para fiscalizar y realizar un seguimiento en cuanto al cumplimiento de estas proyecciones, el modelo establece hitos de control. La Figura 5.80 desgrana estos cortes temporales, evidenciando que el verdadero quiebre tecnológico ocurre en la transición entre 2040 y 2050, momento en que el escenario ambicioso logra comprimir las emisiones hasta los 6,6 Mt anuales, menos de la mitad del volumen inercial proyectado.

Este aparente milagro estadístico se explica al generar y revisar en detalle la intensidad de carbono operacional. Tal como ilustra la Figura 5.81, el sistema logra un nivel de optimización tal que la huella por pasajero se desploma desde los 155 kg de  $CO_2$

actuales a niveles cercanos a los 65 kg para 2050. Este indicador ratifica un desacople exitoso, dado que la industria logra absorber el alza de la demanda de vuelos reduciendo drásticamente su penalización climática individual.

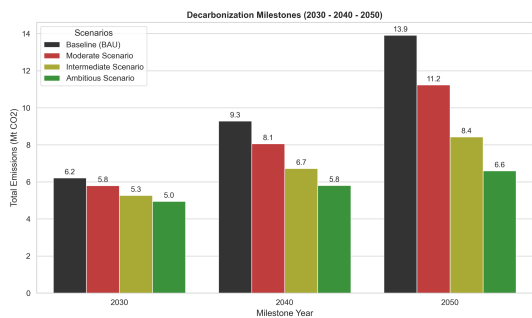


Figura 5.80: Hitos de descarbonización. La brecha de mitigación se consolida fuertemente hacia el final del periodo modelado.

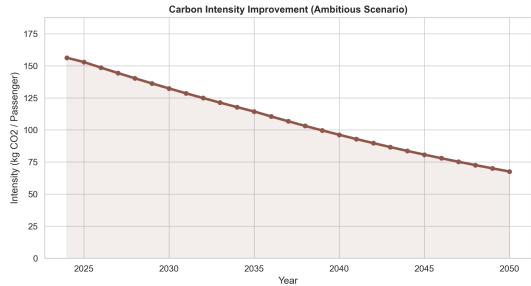


Figura 5.81: Mejora en la intensidad de carbono operacional, demostrando una caída sostenida en las emisiones por pasajero transportado.

Ahora bien, de manera análoga a lo realizado con las proyecciones y vastas simulaciones generadas para el transporte marítimo, al trasladar toda esta matriz matemática a un *dashboard* interactivo en Power BI, es posible diseccionar las variables que traccionan esta caída. Las herramientas de inteligencia de negocios, como la empleada en esta investigación y que se presenta a continuación, permiten filtrar y aislar el rendimiento exacto de cada política implementada, revelando qué tecnologías rinden frutos y cuáles enfrentan limitantes físicas.

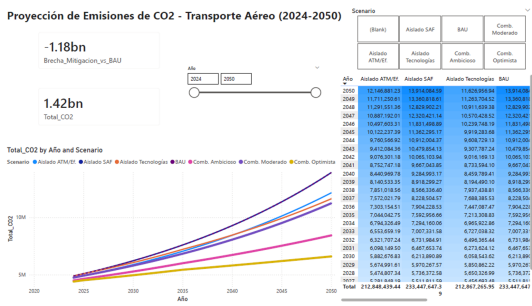


Figura 5.82: Panel interactivo general de proyecciones aéreas, detallando los valores absolutos por año bajo múltiples combinaciones de políticas y escenarios simulados.

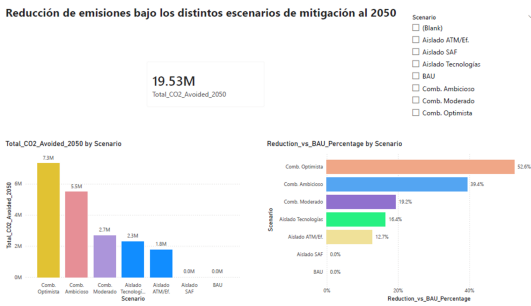


Figura 5.83: Desempeño relativo de los escenarios. Destaca el nulo aporte del vector .Aislado SAF.<sup>en</sup> la contabilidad directa de dióxido de carbono.

Al revisar las métricas de reducción en la Figura 5.83, salta a la vista una anomalía contable que exige una rigurosa aclaración técnica. La intervención denominada .Aislado

SAF"(Combustible de Aviación Sostenible) reporta una mitigación de 0.0 millones de toneladas de  $CO_2$  y un 0.0 % de reducción frente al escenario base. Esta misma cifra se repite de forma tajante en el diagrama de cascada de la Figura 5.84, donde el pilar del SAF no aporta a la reducción de los 13,9 Mt inerciales. Este fenómeno obedece estrictamente a las fronteras del análisis utilizado y se ha explicado anteriormente en detalle en la sección de metodología de proyección de emisiones del transporte aéreo nacional bajo diversos escenarios de mitigación. De todas maneras y para explicar en profundidad esta situación, se debe recordar que los gráficos expuestos están calculados bajo un enfoque *Tank-to-Wake* (TtW), es decir, midiendo exclusivamente lo que emite el tubo de escape de la aeronave durante el vuelo. Bajo este prisma físico, esta investigación llevada a cabo ha encontrado que el SAF posee exactamente la misma estequiometría de combustión que el kerosene tradicional (Jet A-1). Por consiguiente, al quemar un litro de SAF, los motores de la turbina liberan la misma masa de dióxido de carbono a la atmósfera que al quemar combustible fósil. La ventaja climática real del SAF se contabiliza al analizar su ciclo de vida completo ya que recae en su etapa de producción (captura previa de carbono) bajo este análisis de Ciclo de Vida completo mencionado anteriormente, conocido como ciclo o enfoque *Well-to-Wake*, el cual será abordado en las secciones posteriores.

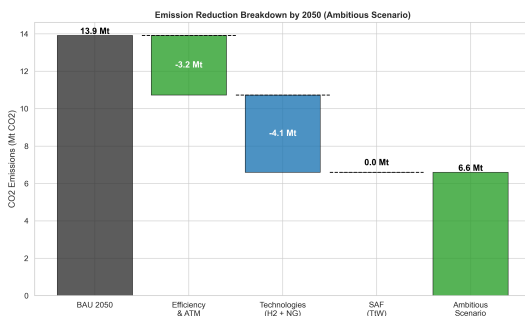


Figura 5.84: Diagrama de cascada (Waterfall) de reducción de emisiones al 2050. Se explicita y evidencia el nulo aporte del SAF bajo la lupa del análisis Tank-to-Wake.

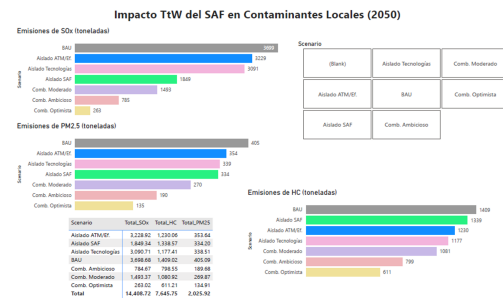


Figura 5.85: Hoja 3 del Dashboard interactivo confeccionado, en donde se presenta el impacto del SAF sobre contaminantes locales. Pese a no reducir el  $CO_2$  en vuelo, minimiza radicalmente la expulsión de  $SO_x$  y Material Particulado.

No obstante lo anterior, se debe precisar que catalogar al SAF como inútil en la etapa de vuelo sería un error grave, ya que si cambiamos el foco desde los gases de efecto invernadero hacia los contaminantes de alcance local, el panorama cambia drásticamente. La Figura 5.85 analiza el impacto directo sobre la calidad del aire del



entorno aeroportuario. Al carecer de las impurezas propias del refino del petróleo crudo, la combustión del SAF destruye casi por completo la formación de Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ) e hidrocarburos no quemados, a la vez que comprime enormemente la expulsión de material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ). Así, mientras su impacto en el calentamiento global requiere la mirada extendida de su ciclo de vida, su beneficio inmediato ante el cambio climático global es directo, cuantificable e indiscutible desde el primer minuto de ignición.

### **5.3.1. Ampliación de Fronteras: Enfoque de Ciclo de Vida (LCA) y Calidad del Aire**

Continuando con este análisis y proyección de emisiones, es importante sacar a la luz que la aparente ineficacia climática del Combustible de Aviación Sostenible (SAF) advertida en el análisis anterior desaparece por completo al expandir el perímetro de evaluación. Al abandonar el estricto enfoque de tubo de escape (Tank-to-Wake) y adoptar una contabilidad de Ciclo de Vida (Well-to-Wake o LCA), el modelo reconoce la captura de carbono ocurrida durante la fase de crecimiento de la biomasa que origina el biocombustible. De esta manera, asignando un factor de reducción conservador del 70 % respecto a la huella del kerosene fósil tradicional, siguiendo los lineamientos y metodologías nacionales e internacionales explicadas, descubiertas y avaladas en esta investigación, la arquitectura matemática de los escenarios sufre un vuelco radical. La Figura 5.86 expone este contraste cara a cara para el escenario más ambicioso. Lo que antes figuraba como un remanente inyectado a la atmósfera de 6,6 millones de toneladas de  $CO_2$ , se desploma a apenas 2,7 Mt gracias al crédito ambiental del SAF, el cual aporta por sí solo una cuña de mitigación equivalente a 6,1 Mt.

Al proyectar esta corrección metodológica sobre la serie de tiempo completa (Figura 5.87), se dimensiona la verdadera magnitud del esfuerzo de sustitución energética. La brecha que se abre entre la línea punteada roja (evaluación física en vuelo) y la curva verde continua (evaluación holística) representa un ahorro acumulado monumental de 46,1 Mt de  $CO_2$ . En términos de planificación climática nacional, ignorar este volumen significaría desechar una de las palancas más potentes para descarbonizar la economía. De hecho y siguiendo con este mismo punto, al recalcular todos los escenarios de modelación bajo esta nueva óptica (Figura 5.88), el abanico de trayectorias se hunde de manera generalizada hacia la mitad inferior del gráfico. La alternativa más agresiva logra quebrar la tendencia al alza antes de 2030, forzando un declive sostenido que

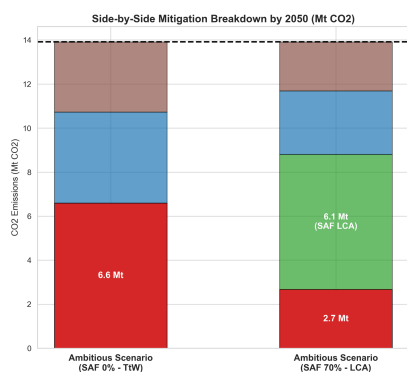


Figura 5.86: Contraste metodológico al 2050. La incorporación del enfoque LCA le otorga al SAF una capacidad de abatimiento de 6,1 Mt de  $CO_2$ , comprimiendo severamente las emisiones residuales.

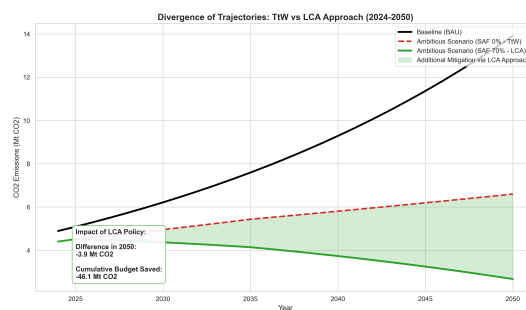


Figura 5.87: Divergencia temporal entre los enfoques TtW y LCA. La política de combustibles sostenibles salva un presupuesto acumulado de más de 46 millones de toneladas.

rompe el piso de los 3 millones de toneladas anuales para mediados de siglo, un hito impensado bajo la combustión fósil convencional.

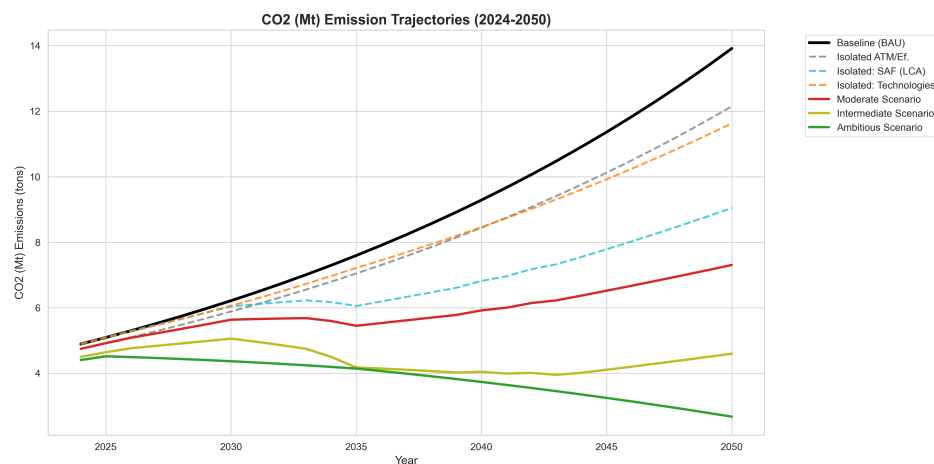


Figura 5.88: Trayectorias corregidas de  $CO_2$  bajo contabilidad de Ciclo de Vida (70 % de reducción por SAF). El escenario ambicioso logra revertir la inercia del crecimiento de la demanda nacional.

Ahora bien, el impacto del transporte aéreo no se agota en las altas capas de la atmósfera ni e centra solo en el calentamiento global, dado que para las comunidades aledañas a los terminales aeroportuarios, la prioridad radica en los contaminantes de alcance local. En este dominio, los modelos revelan que las políticas de eficiencia y el recambio de la matriz energética operan como un escudo protector sumamente eficaz

contra el deterioro de la calidad del aire.

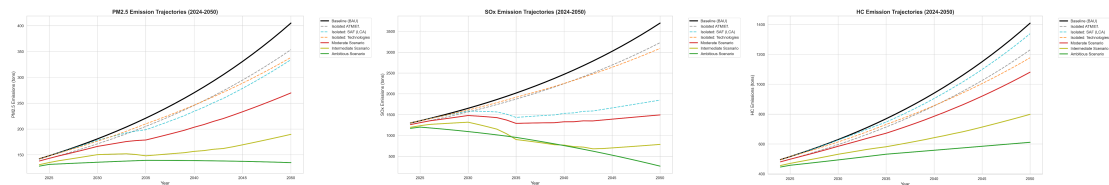


Figura 5.89: Trayectorias de Material Particulado Fino ( $PM_{2,5}$ ).  
Figura 5.90: Desplome proyección de los Óxidos de Azufre ( $SO_x$ ).  
Figura 5.91: Contención en la liberación de Hidrocarburos (HC).

Las tres gráficas expuestas en esta investigación (Figuras 5.89, 5.90 y 5.91) mapean el comportamiento de agentes químicos agresivos para la salud respiratoria. Resalta con particular crudeza la proyección inercial de los óxidos de azufre, que bajo un escenario de inacción (BAU) amenazan con rozar las 3.700 toneladas anuales, saturando el radio de influencia de las pistas. Frente a esta amenaza, el escenario de mitigación ambicioso (curva verde inferior) logra aplastar estas emisiones abordadas en los tres frentes. En el caso del azufre, la caída es casi total, precipitando la curva por debajo de las 500 toneladas. Esta drástica limpieza del chorro de escape se apoya directamente en la naturaleza química del SAF, ya que al tratarse de un combustible sintético y refinado sin las trazas pesadas propias del petróleo, su combustión es inherentemente más limpia, suprimiendo la génesis de hollín y particulado ultrafino desde la propia cámara de combustión de las turbinas.

Por otra parte y para consolidar la evidencia sobre este impacto local y las medidas de mitigación simuladas, es que resulta sumamente esclarecedor cuantificar las reducciones relativas de cada contaminante según cada escenario y medida planteada, lo cual es fundamental y se alinea con lo realizado para los otros medios de transporte. La Figura 5.92 despliega una matriz de calor que mide la contracción porcentual de las emisiones frente al escenario base (BAU) proyectado al 2050.

El desglose de este panel térmico arroja conclusiones técnicas de gran valor para la formulación de políticas ambientales. Observando la fila correspondiente a la adopción aislada de SAF, se confirma la caída del 50 % en los óxidos de azufre y del 17,5 % en material particulado fino. Sin embargo, algo importante a destacar y que puede llamar profundamente la atención, es el nulo efecto que tiene este biocombustible sobre los Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ). Esta divergencia, aún cuando puede ser algo contraintuitiva, tiene una explicación clara y concreta anclada en la termodinámica de la combustión de las turbinas, ya que se debe recordar que la formación de  $NO_x$

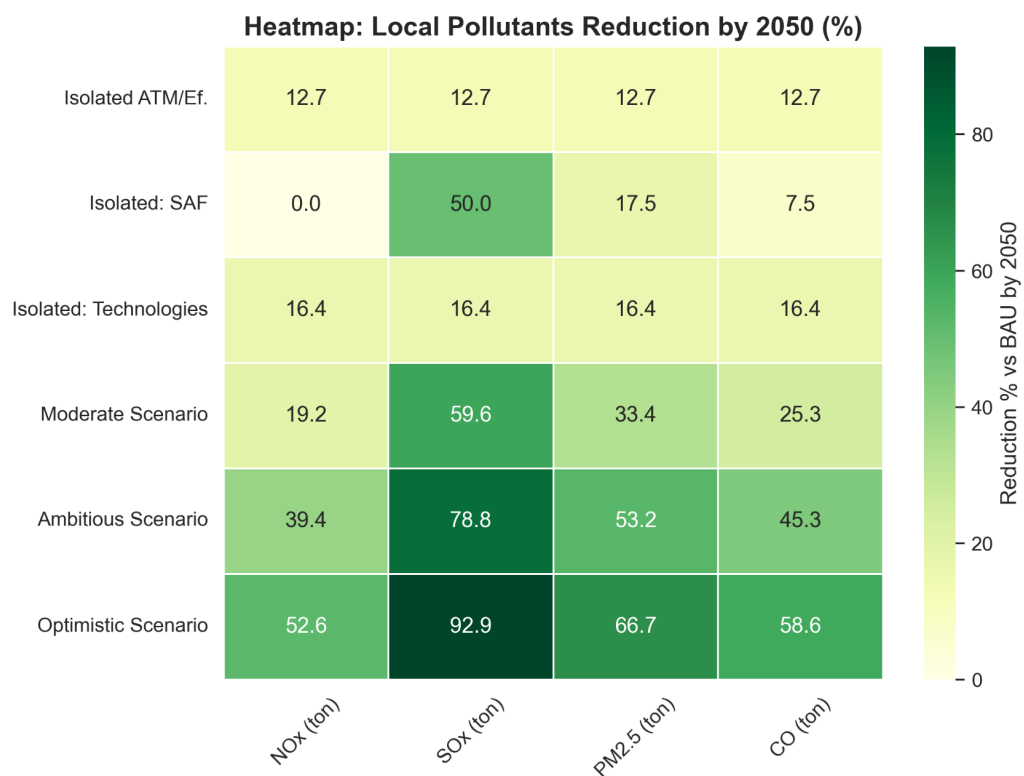


Figura 5.92: Mapa de calor con la reducción porcentual de contaminantes locales. Se evidencia la efectividad de las distintas estrategias para abatir la toxicidad en el entorno aeroportuario.

obedece principalmente a las altísimas temperaturas que alcanza el aire en la cámara de combustión (mecanismo de Zeldovich) y no precisamente a la estequiometría y/o composición química del combustible ingresado. Por lo tanto, para doblar el nitrógeno, el SAF por sí solo no basta, se requiere la sinergia del "Escenario Optimista", el cual acopla nuevos diseños de motores y perfiles de vuelo más eficientes para alcanzar una mitigación sustancial del 52,6 % en  $NO_x$  y casi erradicar el azufre.

Habiendo despejado el panorama de la calidad del aire, el análisis global del sistema aéreo debe someterse a una última prueba de rigor, correspondiente a la auditoría del presupuesto de carbono. El cambio climático no responde a las emisiones de un año en particular, sino a la masa acumulada de gases de efecto invernadero atrapada en la atmósfera a lo largo de las décadas. Al igual que lo realizado con los otros medios de transporte, se tiene que evaluar el volumen total que la aviación inyectará entre 2024 y 2050 es el indicador definitivo del éxito o fracaso de la descarbonización nacional. Para dimensionar este desafío estructural, las Figuras 5.93 y 5.94 contrastan el consumo del presupuesto de carbono bajo los dos paradigmas contables y metodologías discutidas anteriormente.

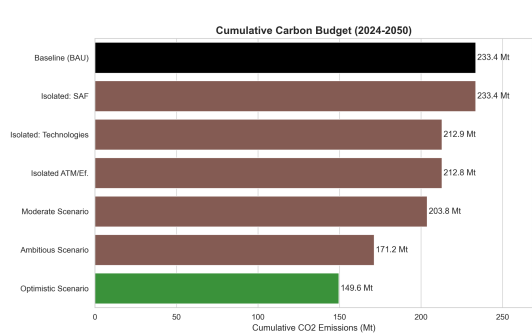


Figura 5.93: Presupuesto de carbono acumulado bajo enfoque TtW.

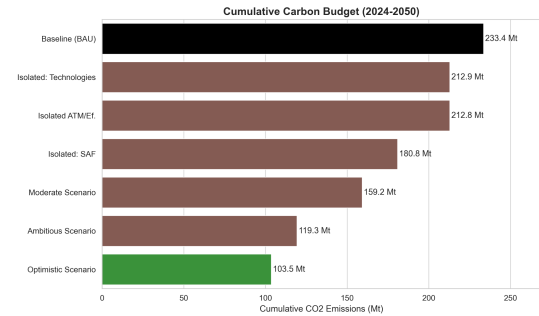


Figura 5.94: Auditoría acumulada aplicando el enfoque de Ciclo de Vida (LCA) para el SAF.

El contraste visual e interpretativo entre ambas columnas es categórico. Si el sistema se audita midiendo netamente la expulsión en vuelo (Figura 5.93), la inercia del escenario base consumirá un agobiante total de 233,4 millones de toneladas de  $CO_2$  en este cuarto de siglo. Bajo esta lupa restrictiva, forzar la adopción exclusiva de SAF ("Isolated: SAF") no le restaría un solo gramo a ese abultado presupuesto, dejando la responsabilidad de la mitigación puramente en manos de la eficiencia operativa y tecnológica, logrando comprimir el volumen, en el mejor de los casos, a 149,6 Mt.

Sin embargo, al aplicar la métrica del Análisis de Ciclo de Vida (Figura 5.94),

reconociendo la capacidad de la biomasa de cerrar el ciclo del carbono según lo expuesto y detallado con anterioridad, la arquitectura del problema se reconfigura por completo. La política aislada de combustibles alternativos amortiza de golpe más de 50 millones de toneladas. Aún más relevante resulta el panorama al evaluar el Escenario Optimista bajo esta contabilidad integral, ya que el clúster aerocomercial consigue anclar sus emisiones acumuladas históricas en 103,5 Mt. Asimismo, almacenar estas cifras en un inventario estructurado demuestra empíricamente que la industria aérea no está condenada a ser un vector de emisiones insalvable. Por lo tanto esta investigación y simulación respectiva llevada a cabo es contundente y categórica con sus resultados: La combinación agresiva de combustibles sintéticos, mejoras aerodinámicas y optimización del control de tráfico, amparada bajo una evaluación metodológica correcta, posee la musculatura suficiente para reducir a la mitad la huella climática de la aviación nacional antes de alcanzar la mitad del siglo.

## **5.4. Conclusiones del Capítulo**

La proyección de los inventarios hacia mediados de siglo expone la verdadera magnitud del desafío climático y logístico que enfrenta la matriz de movilidad nacional. A lo largo de este capítulo, el modelamiento y las simulaciones realizadas demostraron que dejar que la demanda fluya de manera inercial, la cual recordemos que está fuertemente atada al crecimiento del Producto Interno Bruto y a las elasticidades históricas de cada sector, nos empujaría irremediablemente hacia un escenario de saturación ambiental insostenible.

Al someter las proyecciones a distintas trayectorias de mitigación, los resultados revelaron una dinámica sumamente compleja, dado que se exhibe y queda en evidencia que no existe una solución única, y los beneficios ambientales no son lineales. Uno de los hallazgos metodológicos más relevantes es la respuesta asimétrica de los contaminantes frente a las medidas implementadas. Quedó comprobado empíricamente que ciertas políticas o adopciones tecnológicas que logran quebrar de manera agresiva la curva de los gases de efecto invernadero, no siempre resuelven con la misma eficacia las emisiones de contaminantes locales o precursores de material particulado, o viceversa también, es decir, algunas políticas que ayudan a mitigar fuertemente la emisión de contaminantes criterio no impactan de la misma manera en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que obliga a diseñar estrategias mixtas.

En el ámbito aéreo, los números obtenidos derriban varias preconcepciones y validan la necesidad de evaluar el problema desde una óptica integral. Si los escenarios se analizan bajo una lupa restrictiva que solo mide las descargas directas en las aeronaves, es decir, bajo un enfoque Tank-to-Wake (TtW), forzar la adopción de Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF) como medida aislada parece no restar peso al abultado presupuesto de carbono, dejando la responsabilidad de la mitigación casi exclusivamente en manos de las mejoras aerodinámicas o de motor. Sin embargo, al incorporar la métrica del Análisis de Ciclo de Vida (enfoque Well-to-Wake o LCA por sus siglas en inglés), la arquitectura del problema se reconfigura por completo, dado que reconocer matemática y termodinámicamente la capacidad de la biomasa y de los combustibles sintéticos para cerrar el ciclo del carbono transforma al SAF en una herramienta estructural y fundamental. De hecho, el modelamiento confirmó que un escenario optimista, el cual se forma combinando una penetración agresiva de SAF, optimización del control de tráfico aéreo y salto tecnológico en las flotas, tiene la musculatura suficiente para anclar las emisiones acumuladas históricas en 103,5 Mt. Esto significa, en la práctica, que es factible reducir a la mitad la huella climática de la aviación nacional antes de llegar al 2050.

Para el caso del transporte terrestre y marítimo, la lógica deductiva es equivalente, y se evidencia que quebrar la tendencia inercial del escenario base requiere ir mucho más allá de las renovaciones naturales de flota, exigiendo una transición acelerada hacia vectores energéticos de cero y bajas emisiones que logren soportar el aumento proyectado de la carga y el flujo de pasajeros.

Algo importante a destacar es que para realizar los modelos y simulaciones presentadas en este capítulo, se generaron herramientas predictivas totalmente parametrizadas, es decir, modelos computacionales y planillas predictivas en las que cambiando un valor se reconfiguran todos los resultados para los distintos escenarios afectados. Este set de herramientas predictivas paramétricas es un producto valioso que en las manos correctas -como investigadores, tomadores de decisión, etc- sirve para guiar la toma de decisiones actual y evaluar su impacto a futuro.

En definitiva, este capítulo logra demostrar y cuantificar que alcanzar las metas de descarbonización sectorial no es una aspiración teórica, sino un problema duro de ingeniería y política pública que cuenta con varias vías de solución cuantificables. Los modelos aquí desarrollados y las simulaciones realizadas confirman que aislar medidas no sirve para frenar la inercia del transporte, sino más bien que se requiere de un paquete integral y simultáneo de soluciones tecnológicas y operativas. Contar con esta base de

simulación paramétrica entrega finalmente la certidumbre técnica necesaria para tomar decisiones estructurales hoy, antes de que el crecimiento natural de la demanda vuelva inalcanzables los compromisos climáticos que Chile ha planteado para 2050.



## **6. Conclusiones y Recomendaciones**

El desarrollo de esta extensa investigación culmina con hallazgos fundamentales que transforman la manera en que se comprende y gestiona el impacto ambiental de la movilidad en Chile. Al abandonar la rigidez de los inventarios macroscópicos y promedios anuales, este trabajo logró construir un marco analítico capaz de capturar la verdadera naturaleza física, logística y química de las fuentes móviles. A continuación, se detalla cómo el modelo implementado da respuesta a las premisas planteadas al inicio del estudio, desglosando las conclusiones a nivel general y específico, para luego proponer lineamientos estratégicos dirigidos a futuras líneas de investigación.

### **6.1. Conclusiones**

#### **6.1.1. Conclusión General y Validación de la Hipótesis**

La hipótesis central que articuló este trabajo de tesis ha sido confirmada empíricamente, ya que la implementación de un modelo de emisiones de alta resolución espacial y temporal, que integra simultáneamente la dinámica del transporte terrestre, aéreo y marítimo, demostró sin lugar a ambigüedades ser una herramienta indispensable para la comprensión integral de las externalidades del sector en Chile. A diferencia de las estimaciones estáticas tradicionales que se expusieron y detallaron a lo largo de este estudio, esta arquitectura computacional permitió identificar con precisión milimétrica los focos críticos de contaminación local, revelando asimetrías territoriales que antes permanecían ocultas bajo las cifras nacionales.

Al dar cumplimiento al objetivo general, se consolidó un motor de modelación que permite desagregar espacial y temporalmente las emisiones de los tres modos de transporte analizados, y también se generaron modelos de simulación nacional capaz de proyectar la demanda de transporte hacia el año 2050 y evaluar el desempeño de múltiples políticas de mitigación. Este set de herramientas y la plataforma paramétrica construida logró cuantificar cómo la transición tecnológica, la optimización logística y los nuevos vectores energéticos pueden quebrar la curva de emisiones. Con esto, se entrega un instrumento técnico robusto y validado que facilita a los investigadores, partes interesadas y tomadores de decisión el diseño de rutas de descarbonización verdaderamente efectivas, asegurando que las metas climáticas nacionales no comprometan el

desarrollo económico ni la salud de la población.

## 6.1.2. Conclusiones Específicas

El cumplimiento de las metas sucesivas de este trabajo permitió desglosar el problema en tres dimensiones críticas, respondiendo de forma directa a los objetivos específicos planteados:

### 1. Cuantificación y espacialización del inventario base

La aplicación de metodologías de cálculo *bottom-up* con un nivel de detalle Tier 3 junto con la integración de bases de datos relacionales masivas permitieron mapear el inventario de emisiones con un nivel de granularidad sin precedentes. En el transporte terrestre, se comprobó que mientras el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) calca la densidad demográfica de la Región Metropolitana, los precursores tóxicos como los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y el material particulado ( $PM_{2.5}$ ) concentran su impacto principal en las rutas interurbanas de las zonas mineras e industriales, arrastrados por la tracción pesada del diésel.

Para el ecosistema marítimo, el procesamiento de miles de datos y señales satelitales AIS desnudó la realidad de las zonas costeras, ya que queda en evidencia que la fase de estadía en muelle (*Puerto o hotelling*) es la principal causante de la contaminación atmosférica en puertos como San Antonio, Quintero y Mejillones. Paralelamente, la segmentación de la aviación comercial demostró que, si bien la fase de crucero (CCD) domina las emisiones globales de gases de efecto invernadero, son indudablemente los ciclos de aterrizaje y despegue (LTO) los que castigan el aire circundante a los terminales. Además, la incorporación del Esfuerzo de Transporte (FKM) corrigió sesgos históricos, dándole el peso ambiental correcto a las rutas de largo alcance hacia el extremo sur del país.

### 2. Modelación de la dinámica cronológica y espacio-temporal

El sistema de transporte no es plano como se expuso y demostró a lo largo de esta investigación, sino que respira y fluctúa a lo largo del tiempo. Al modelar la variabilidad cronológica, se descubrieron ventanas críticas de exposición que los modelos tradicionales omiten. Se demostró que la química atmosférica en las carreteras cambia drásticamente durante la madrugada, momento en el cual la desaparición del parque liviano y el predominio de camiones pesados dispara el ratio  $NO_x/PM_{2.5}$ .

En el entorno marítimo, se constató que la asfixia portuaria está íntimamente ligada

a los ciclos macroeconómicos, evidenciando un *peak* absoluto de saturación durante los meses de marzo producto de la temporada de exportación agrícola. Asimismo, la aviación exhibió un comportamiento análogo con sus alzas estivales. Al acoplar todos estos perfiles granulares e índices temporales fraccionales con las mallas espaciales, se generaron con éxito matrices dinámicas en formatos estandarizados globales (NetCDF, GeoTIFF), entregando mapas de calor precisos y desagregados que capturan la evolución tridimensional de las plumas de contaminación a lo largo de las 8.760 horas del año.

### **3. Proyección sectorial y evaluación de escenarios de mitigación al 2050**

La prospectiva econométrica hacia mediados de siglo sentenció la inviabilidad ambiental de mantener la inercia tecnológica actual, ya que se logró evidenciar que el crecimiento inercial de la demanda de movilidad saturaría irreversiblemente los ecosistemas locales y globales. La simulación matemática de estrategias de mitigación probó que las soluciones aisladas fracasan frente a la magnitud del problema.

En el transporte terrestre, se evidenció que normativas de combustión avanzadas como Euro 7 operan solo como una tecnología puente, y que la reducción profunda requiere una electrificación agresiva que penetre hasta el segmento de carga pesada, combinada con infraestructura de cambio modal como la expansión de la red de Metro en Santiago, la cual demostró suprimir por sí sola casi un 16 % de la huella urbana. Para la aviación, el modelo confirmó que el uso aeronaves más eficientes (como las aeronaves NEO), la implementación de rutas empleando hidrógeno verde como las simuladas y un mejor control de tráfico aéreo lograrían mitigar notablemente las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero y forzantes climáticos de vida corta asociados a este sector, aún cuando el uso de Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF) parece inútil frente al  $CO_2$  bajo un enfoque exclusivo de tubo de escape (*Tank-to-Wake*), pero al evaluarlo mediante un Análisis de Ciclo de Vida integral (*Well-to-Wake*), se posiciona como el pilar absoluto capaz de quebrar la trayectoria de emisiones. Finalmente, respecto al transporte marítimo, se tiene que la electrificación de puertos junto con la introducción de vectores cero carbono en los buques mitigaría hasta el 90 % del impacto naviero, aunque introduce nuevos desafíos de monitoreo debido a fugas residuales de compuestos como el amoníaco.

## 6.2. Recomendaciones para Trabajos Futuros

La arquitectura paramétrica, las bases de datos depuradas y los códigos desarrollados durante esta investigación conforman un punto de partida sumamente robusto para expandir las fronteras del conocimiento. Con el objetivo de escalar este trabajo y abordar nuevas interrogantes científicas, se sugieren las siguientes líneas de investigación para futuros tesis y grupos de estudio:

- **Acoplamiento con modelos de dispersión fotoquímica 3D:** Las matrices generadas en formato NetCDF constituyen el insumo primario ideal para simuladores atmosféricos a mesoescala. Se recomienda integrar estos inventarios dinámicos con modelos como WRF-Chem o CMAQ para evaluar el transporte de masas de aire, la deposición seca/húmeda y la formación de contaminantes secundarios (como el ozono troposférico y el aerosol secundario orgánico e inorgánico) en cuencas complejas de Chile.
- **Expansión del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a toda la matriz energética:** Si bien esta tesis abordó el enfoque de ciclo de vida completo (*Well-to-Wake*) para los combustibles de aviación sostenible (SAF), resulta imperativo extender esta evaluación a la electromovilidad terrestre y a los combustibles sintéticos marítimos. Investigaciones futuras deberían integrar la curva de descarbonización de la matriz de generación eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para cuantificar la verdadera huella "de la cuna a la rueda" (*Well-to-Wheel*) de los vehículos cero emisiones operando en Chile.
- **Implementación de Machine Learning para actualización en tiempo real:** El levantamiento de datos masivos como las señales AIS y los registros de pódicos de telepeaje fue un proceso intensivo. Se sugiere a futuros investigadores desarrollar algoritmos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) capaces de consumir y limpiar estas bases de datos en tiempo real mediante APIs gubernamentales, automatizando la actualización de los factores de actividad y permitiendo pronósticos de contaminación a muy corto plazo (nowcasting).
- **Evaluación epidemiológica y valoración económica de externalidades:** Al contar con una resolución espacial a nivel de calle (celdas de  $1 \times 1$  km) y perfiles horarios, existe la oportunidad de cruzar estos mapas de calor con densidades

poblacionales y bases de datos hospitalarias (DEIS). Un trabajo futuro podría monetizar el costo en salud pública atribuible a las emisiones del transporte pesado, calculando los beneficios económicos reales que traería implementar zonas de bajas emisiones (LEZ) o la adopción de *Cold Ironing* en los principales puertos del país.

# Bibliografía

- [1] Agencia de Sostenibilidad Energética. Giro limpio celebra ceremonia de certificación 2025. Ministerio de Energía, Chile, 2025.
- [2] Agora Verkehrswende and GIZ. Towards decarbonising transport: Chile 2025. Technical report, 2025.
- [3] Airbus S.A.S. ZEROe: Our hydrogen-powered aircraft. <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe-our-hydrogen-powered-aircraft>.
- [4] Airbus S.A.S. Global market forecast 2025–2044: Connecting people and communities. Technical report, Airbus, Toulouse, 2025.
- [5] Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (NAPA). The carbon footprint of asphalt pavements – a reference document for decarbonization, 2024.
- [6] Aviation Week. Airbus pushes ZEROe aircraft project timeline to 2040s. *Aviation Week & Space Technology*, apr 2026.
- [7] S. Batterman, R. Cook, and T. Justin. Temporal variation of traffic on highways and the development of accurate temporal allocation factors. *Atmospheric Environment*, 107:351–363, 2015.
- [8] R. Bun, Z. Nahorski, J. Horabik-Pyzel, et al. Development of a high-resolution spatial inventory of greenhouse gas emissions for poland from stationary and mobile sources. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(5):853–880, 2018.
- [9] X. Chen and J. Yang. Analysis of the uncertainty of the ais-based bottom-up approach for estimating ship emissions. *Marine Pollution Bulletin*, 199:115968, 2024.
- [10] Climate Analytics. 1.5°C national pathway explorer: Chile - transport sector, 2025.
- [11] Matías Concha Palacios. Modelo para estimar la distribución espacial y temporal de emisiones contaminantes generadas en Chile por sector transporte, modos

aéreo y marítimo. Memoria de titulación para optar al título de ingeniero civil mecánico, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago, Chile, 2020.

- [12] M. Crippa et al. High resolution temporal profiles in the emissions database for global atmospheric research. *Scientific Data*, 7(1):121, 2020.
- [13] M. Crippa et al. Insights into the spatial distribution of global, national, and subnational ghg emissions. *Earth System Science Data*, 16:2811–2845, 2024.
- [14] M. Crippa, D. Guizzardi, M. Muntean, et al. Edgar v7.0 greenhouse gas emissions. Technical report, European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2023.
- [15] Ministerio de Energía. Política energética nacional. actualización 2022, 2022. En línea. Último acceso: 23-08-2024.
- [16] Ministerio de Medio Ambiente. Ley marco de cambio climático, 2022. En línea. Último acceso: 2024.
- [17] Instituto Nacional de Normalización. Gases de efecto invernadero – orientaciones para demostrar la neutralidad de emisiones (nch3300), 2014. En línea. Último acceso: 2024.
- [18] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Flying using 100 percent sustainable aviation fuel significantly reduces non-carbon-dioxide emissions, jun 2024. DLR News Release. <https://www.dlr.de/en/latest/news/2024/flying-using-100-percent-saf>.
- [19] DGAC. Estadística de tráfico aéreo, documento normativo dap/dpl01b. Technical report, DGAC, Chile, 2009.
- [20] Dirección General de Aeronáutica Civil. Tráfico aéreo comercial en el país, 2024. DGAC, Chile.
- [21] D. DuBois and G. C. Paynter. Fuel flow method 2 for estimating aircraft emissions. Technical Paper 2006-01-1987, SAE, 2006.
- [22] EDGAR v8.1. Global air pollutant emissions. European Commission, JRC, 2024.

- [23] H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Japan, 2006.
- [24] EMEP/EEA. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023*. European Environment Agency, 2023.
- [25] EMEP/EEA. *Uncertainties*, chapter 5. 2023.
- [26] European Commission JRC. *COPERT - Computer model to calculate emissions from road traffic*. JRC Policy Model Inventory, 2023.
- [27] European Environment Agency. *Estimating emissions from road transport - COPERT*. EEA, Copenhagen, 2014.
- [28] European Environment Agency. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Technical Report EEA Report No 13/2019, EEA, Copenhagen, 2019.
- [29] European Environment Agency. *EMEP/EEA Guidebook 2023 - Update 2024, Chapter 1.A.3.b.i-iv Road Transport*, 2024.
- [30] International Organization for Standardization. Greenhouse gases. part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals (iso 14064-1), 2018.
- [31] International Organization for Standardization. Greenhouse gases. part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements (iso 14064-2), 2019. En línea. Último acceso: 2024.
- [32] International Organization for Standardization. Climate change management. transition to net zero – part 1: Carbon neutrality (iso 14068-1), 2023.
- [33] World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute. *Product life cycle accounting and reporting standard*, 2011. En línea. Último acceso: 2024.
- [34] A. E. Gaughan, T. Oda, A. Sorichetta, et al. Evaluating nighttime lights and population distribution as proxies for mapping anthropogenic CO<sub>2</sub> emission. *Environmental Research Communications*, 1(9):091006, 2019.



- [35] S. Ghosal, M. Singh, S. Ghude, et al. Developing gridded emission inventory from high-resolution satellite object detection for improved air quality forecasts. *arXiv preprint arXiv:2410.19773*, 2024.
- [36] Giro Limpio. Guía de proyecciones de emisiones y consumos energéticos en el sector transporte de carga en Chile 2020-2050. Technical report, 2023.
- [37] GIZ and Ricardo Energy and Environment. Tutorial: How to apply the leap software in the transport sector, 2022.
- [38] C. M. González et al. An algorithm for spatial and temporal disaggregation of on-road mobile source emission inventories. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(9):2119–2134, 2020.
- [39] M. Guevara et al. Copernicus atmosphere monitoring service temporal profiles (cams-tempo). *Earth System Science Data*, 13(2):367–404, 2021.
- [40] M. Guevara et al. Technical note: sensitivity of the cams regional air quality modelling system to anthropogenic emission temporal variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25:13245–13268, 2025.
- [41] M. Guevara, C. Tena, M. Porquet, O. Jorba, and C. Pérez García-Pando. A benchmarking tool to screen and compare bottom-up and top-down emission inventories. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12(12):1437–1452, 2019.
- [42] i2am-paris.eu. Leap - long-range energy alternatives planning system, 2016.
- [43] IATA. *CORSIA Handbook*, 2023.
- [44] IATA. Offsetting CO<sub>2</sub> emissions with CORSIA, 2024.
- [45] ICAO. *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*, 2023.
- [46] ICAO. *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology, Version 13.1*. International Civil Aviation Organization, 2024.
- [47] ICAO / EASA. ICAO aircraft engine emissions databank. <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.

- [48] Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. Parque de vehículos en circulación 2024. Technical report, INE, Santiago, 2025.
- [49] International Air Transport Association. Fly net zero: Our commitment to achieve net zero carbon emissions by 2050, 2021. Geneva: IATA. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>.
- [50] International Civil Aviation Organization. *Airport Air Quality Manual, Doc 9889*, 2011. 2nd ed. update 2022. Montreal: ICAO.
- [51] International Council on Clean Transportation. Aviation vision 2050. Technical report, ICCT, sep 2025.
- [52] International Council on Clean Transportation. Chile can help pave the way to clean transport in latin america. ICCT Blog, 2025.
- [53] International Council on Clean Transportation. Fuel burn of new commercial jet aircraft: 1960 to 2024. Technical report, ICCT, Washington D.C., 2025.
- [54] International Energy Agency. World energy balances: Overview, 2020. En línea. Último acceso: 2024.
- [55] International Energy Agency. Coal 2023, 2023. En línea.
- [56] International Energy Agency. Energy statistics data browser, 2023. En línea. Último acceso: 2024.
- [57] International Maritime Organization. *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, 2023.
- [58] International Monetary Fund. World economic outlook. Washington D.C.: IMF, various issues.
- [59] International Transport Forum. *Transport Outlook 2023: Urgent Need for More Ambition to Decarbonize Transport*. OECD Publishing, Paris, 2024.
- [60] IPCC. *Quantifying Uncertainties in Practice*, volume 1, chapter 3. 2006.
- [61] IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC, Switzerland, 2019.

- [62] IPCC. 2019 refinement to the 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories, 2019. Op. cit. (Véase referencia [61]).
- [63] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press, 2021.
- [64] IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*, chapter 10: Transport. Cambridge University Press, 2022.
- [65] IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, 2024. En línea.
- [66] J. P. Jalkanen, L. Johansson, and J. Kukkonen. A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the european sea areas in 2011. *ACP*, 16(1):71–84, 2016.
- [67] Junta de Aeronáutica Civil de Chile. Informes estadísticos mensuales del tráfico aéreo en chile, 2025.
- [68] Junta de Aeronáutica Civil de Chile. Resumen estadístico de transporte aéreo comercial 2024, 2025. Santiago, Chile. Disponible en: <https://www.jac.gob.cl/estadisticas-2024/>.
- [69] N. Karvosenoja, V. V. Paunu, M. Savolahti, et al. A high-resolution national emission inventory and dispersion modelling—is population density a sufficient proxy variable? In *Proceedings, International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2018.
- [70] N. Karvosenoja, V. V. Paunu, M. Savolahti, et al. A high-resolution national emission inventory and dispersion modelling—is population density a sufficient proxy variable?, 2018. Op. cit. (Véase referencia [69]).
- [71] D. Kramel et al. Advancing ssp-aligned scenarios of shipping toward 2050. *Scientific Reports*, 14:8854, 2024.
- [72] D.S. Lee et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244:117834, 2021.

- [73] Y. Liu, X. Luo, Y. Wang, L. Zhang, and M. Zhang. Development of a road-level  $\text{CO}_2$  emission estimation model using geographically weighted convolutional neural network. *Transportation Research Part D*, 85:102429, 2020.
- [74] Ministerio de Medio Ambiente de Chile. Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile, serie 1990–2020. quinto informe bienal de actualización, 2022.
- [75] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile / JAC. Plan de acción de Chile, 2da edición, 2025. Montreal: ICAO. <https://www.icao.int/sites/default/files/ENV/State%20Action%20Plan/Plan-de-Accion-Chile-2da-Edicion-2025.pdf>.
- [76] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Estrategia climática de largo plazo de Chile. Technical report, Gobierno de Chile, 2021.
- [77] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Contribución determinada a nivel nacional (ndc) de Chile - actualización 2020. Technical report, 2022.
- [78] Ministerio del Medio Ambiente de Chile - CONAMA. Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles. Technical report, 2008.
- [79] NDC Partnership. Long-range energy alternatives planning system (leap). Climate Toolbox, 2024.
- [80] L. Ntziachristos et al. *Road Transport Chapter*. 2007. EEA Technical Report No 16/2007.
- [81] L. Ntziachristos, D. Gkatzoflias, C. Kouridis, and Z. Samaras. Copert: A European road transport emission inventory model. In *Information Technologies in Environmental Engineering*, pages 491–504. 2009.
- [82] OECD. *Ports Policy Review of Chile*. OECD Publishing, 2016.
- [83] N. Olmer, B. Comer, B. Roy, X. Mao, and D. Rutherford. Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015. Technical report, ICCT, Washington, DC, 2017.

- [84] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5°C. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, 2018.
- [85] Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth assessment report. climate change 2023, 2023. En línea. Último acceso: 23-08-2024.
- [86] M. Osses et al. High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990-2020. *Earth System Science Data*, 14:1359–1376, 2022.
- [87] M. Osses, N. Rojas, C. Ibarra, et al. High-definition spatial distribution maps of on-road transport exhaust emissions in Chile, 1990-2020. [Data set] Mendeley Data, V2, 2021.
- [88] K. Riahi et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications. *Global Environmental Change*, 42:153–168, 2017.
- [89] N. Rojas, L. Gallardo, M. Osses, N. Pantoja, V. Valdebenito, I. Laengle, and D. Osses. Análisis y evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte de Chile, 2023. Informe Técnico / Reporte.
- [90] P. E. Saide, R. Zah, M. Osses, and M. Ossés de Eicker. Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified road networks. *Atmospheric Environment*, 43(32):4921–4931, 2009.
- [91] L. Schipper, C. Marie-Lilliu, and R. Gorham. *Flexing the Link between Transport and Greenhouse Gas Emissions*. IEA, Paris, 2000.
- [92] Sistema Nacional de Inventarios de GEI de Chile. Ingei 1990-2022. Technical report, 2024.
- [93] SLOCAT. Asi-2025: Avoid-shift-improve framework, 2025. SLOCAT Partnership on Sustainable, Low Carbon Transport.
- [94] M. D. Staples et al. Corsia: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle ghg emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150:111398, 2021.

- [95] Stockholm Environment Institute. Leap - low emissions analysis platform, 2024.
- [96] A. Swarnkar. Development of a gis-based approach for spatial disaggregation of emissions from road traffic. In *Urban Mobility India Conference Proceedings*, 2024.
- [97] The Boeing Company. Commercial market outlook 2025–2044. Technical report, Boeing, Arlington, VA, 2025.
- [98] M. Trombetti, P. Thunis, B. Bessagnet, et al. Downscaling methodology to produce a high resolution gridded emission inventory to support regional and urban air quality modelling. Technical report, Publications Office of the European Union, 2017. EUR 28827 EN.
- [99] D. Tuia, M. Osses de Eicker, R. Zah, et al. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. *Atmospheric Environment*, 41(17):3658–3671, 2007.
- [100] TUMI. Avoid-shift-improve framework explained, 2024.
- [101] UK NAEI. Road transport emission factors: 2023 naei. Technical report, Dept. for Energy Security & Net Zero, 2023.
- [102] UNECE. Preliminary information on context, principles and mapping techniques for gridded emissions. Technical report, EMEP/CEIP, 2024.
- [103] United Nations Development Programme. Why low-emissions transport is key for latin america and the caribbean. Technical report, UNDP Climate Promise, 2023.
- [104] U.S. Energy Information Administration. Chapter 8. transportation sector energy consumption, 2016. En línea.
- [105] U.S. Energy Information Administration. Oil and petroleum products explained: Oil and the environment, 2024. En línea. Último acceso: 09-2024.
- [106] U.S. Environmental Protection Agency. Ap-42: Compilation of air emissions factors from stationary sources, 2024. En línea.
- [107] D. P. Van Vuuren et al. The 2021 ssp scenarios of the image 3.2 model. Technical Report 4740, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2021.

- [108] C. Voigt et al. Measurements of particle emissions of an A350-941 burning 100 % sustainable aviation fuel. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24:11255–11272, 2024.
- [109] Vuelo Limpio. Informe ambiental 2025 de la OACI destaca avances de chile en sostenibilidad aeronáutica, jul 2025. <https://vuelolimpio.cl/2025/07/08/envr25/>.
- [110] Z. Wan et al. An operational-mode-based method for estimating ship emissions in port waters. *Transportation Research Part D*, 101:103091, 2021.
- [111] Wikipedia. Copert, 2024.
- [112] R. Wu, Y. Bo, J. Li, L. Li, and H. Zhang. Development of a high-resolution integrated emission inventory of air pollutants for china (intac). *Earth System Science Data*, 16(6):2893–2926, 2024.
- [113] W. Xie et al. Maritime greenhouse gas emission estimation and forecasting through ais data analytics: a case study of tianjin port. *Frontiers in Marine Science*, 10:1308981, 2023.
- [114] W. Yi et al. The high-resolution global shipping emission inventory by ais data (seimv2.2). *Earth System Science Data*, 17(1):277–304, 2025.
- [115] B. Zhao et al. Resolution dependence of uncertainties in gridded emission inventories. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2):921–937, 2017.
- [116] N. Álamos et al. High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining and residential activities in chile. *ESSD*, 14(1):361–391, 2022.
- [117] N. Álamos, N. Huneus, M. Opazo, et al. Inema: High resolution inventory of atmospheric emissions of chile. [Data set] Zenodo, 2024.

## A. Anexos

Para el correcto desarrollo de esta investigación y la obtención de los resultados y cartografías de alta resolución espacial presentadas anteriormente y analizadas en este trabajo de tesis, fue necesaria la elaboración de códigos geoespaciales y espacio-temporales capaces de procesar grandes volúmenes de datos de manera quirúrgica y realizando para cada caso un balance de masa estricto de tal manera de asegurar que no se esté perdiendo información valiosa de emisiones al ejecutar estos modelos geoespaciales y realizar esta desagregación espacio-temporal de las emisiones del transporte multimodal. Es por este motivo que en este capítulo de Anexos se presentarán algunos de los modelos y códigos Python elaborados y ejecutados a lo largo de esta investigación. Destacar que se ha escogido Python como el motor y lenguaje computacional primario para manejar estos datos geoespaciales y realizar este análisis dada su versatilidad y amplia gama de librerías disponibles en sus distintas versiones, por lo cual también cabe mencionar que fue necesario generar más de un ambiente virtual para manejar distintas librerías y funciones en función de lo que fuera necesario.

### A.1. Motor de Desagregación Espacial de Emisiones Marítimas

El siguiente script en lenguaje Python constituye el núcleo matemático y geoespacial del modelo de emisiones marítimas desarrollado. Su función es transicionar desde un enfoque vectorial discreto hacia un modelo matricial continuo (ráster), asegurando la compatibilidad geométrica con la grilla del modelo INEMA y garantizando la conservación absoluta de la masa de contaminantes.

El algoritmo opera bajo algunos principios metodológicos fundamentales que aseguran la fiabilidad del inventario espacializado:

- **Distribución de Fase de Crucero:** Para el tráfico en alta mar, el modelo no asigna la masa de forma binaria ni arbitraria, sino que calcula la intersección topológica exacta entre la ruta y la grilla base. La masa de emisión ( $E$ ) de un contaminante específico inyectada en una celda de la matriz se rige por la siguiente relación



geométrica simplificada:

$$E_{celda} = \sum \left( \frac{L_{celda}}{L_{ruta}} \cdot E_{ruta} \right)$$

donde  $L_{celda}$  corresponde a la longitud de la trayectoria intersectada dentro del límite de la celda, y  $L_{ruta}$  es la longitud geométrica total de la ruta evaluada.

- **Auditoría y Corrección de Borde:** Uno de los mayores desafíos en la rasterización es la pérdida de masa por truncamiento en los bordes de la grilla espacial (*Edge Loss*). Es por este motivo que el código incorpora un módulo *QA/QC* que totaliza la matriz generada y la compara con el inventario tabular original, de tal manera de que si se detecta un diferencial que supere el umbral de tolerancia auditado ( $\epsilon = 1 \times 10^{-4}$ ), el algoritmo aplica un factor de escala correctivo  $\kappa$  a toda la matriz:

$$\kappa = \frac{Masa_{Objetivo}}{Masa_{Asignada}}$$

Esto fuerza el balance de masa a un estado perfecto antes de proceder con la generación de las salidas NetCDF y GeoTIFF.

A continuación, se detalla el código fuente íntegro de este motor de procesamiento espacial.

#### Desagregacion\_Espacial\_Maritima\_QAQC.py

```
1 import os
2 import sys
3 import logging
4 import warnings
5 from pathlib import Path
6 import re
7 import numpy as np
8 import pandas as pd
9 import geopandas as gpd
10 import xarray as xr
11 import rasterio
12 from affine import Affine
13 from shapely.geometry import box, Point
14 import matplotlib
15 matplotlib.use('Agg') # Disable interactive display for massive plotting
16 import matplotlib.pyplot as plt
17 import matplotlib.colors as mcolors
18 from matplotlib.ticker import FuncFormatter
19 import seaborn as sns
20 from scipy.ndimage import gaussian_filter
```

```

21
22     # Mute standard spatial warnings for cleaner logs
23     warnings.filterwarnings("ignore", category=UserWarning)
24
25     # Logging Setup
26     logging.basicConfig(
27         level=logging.INFO,
28         format='%(asctime)s_-%(levelname)s_-%(message)s',
29         datefmt='%Y-%m-%d_%H:%M:%S'
30     )
31
32
33     YEAR_ANALYSIS = 2019
34
35     # Pollutants to process ('ALL' or specific list)
36     POLLUTANT_SELECTION = ['CO2', 'NOx', 'SO2', 'PM10', 'PM2.5', 'CO', 'NMVOC', '
        BC', 'NH3']
37     # For focused debugging, set this to a subset of pollutants or leave empty to
        process all
38     DEBUG_POLLUTANTS = []
39
40     EPSILON_AUDIT = 1e-4
41     VISUAL_FLOOR = 1e-8
42     UNIT_LABEL = "Gg"
43     EPSG_WGS84 = 4326
44
45
46     BASE_DIR = Path(r"C:\Users\david\Desktop\David_Bevilacqua_Files\python1")
47     PROJECT_DIR = BASE_DIR / f"Modular_Emissions_System_2023"
48
49
50     INPUT_DIR = PROJECT_DIR / f"01_Inventario_Consolidado_Hibrido_{YEAR_ANALYSIS}"
51     FILE_GPKG_MASTER = INPUT_DIR / f"Red_Maritima_Maestra_{YEAR_ANALYSIS}.gpkg"
52     FILE_EXCEL_PORTS = INPUT_DIR / f"Reporte_Puertos_Nodos_Emisiones_{
        YEAR_ANALYSIS}.xlsx"
53     FILE_EXCEL_ROUTES = INPUT_DIR / f"Reporte_Rutas_Maritimas_Emisiones_{
        YEAR_ANALYSIS}.xlsx"
54
55     FILE_INEMA_GRID = BASE_DIR / "Inputs" / "inema-2.0_CO2_1A4b_0.01x0.01_2015.nc"
56     URL_CHILE_GEOJSON = "https://raw.githubusercontent.com/johan/world.geo.json/
        master/countries/CHL.geo.json"
57
58     OUTPUT_DIR = PROJECT_DIR / f"02_Desagregacion_Espacial_INEMA_{YEAR_ANALYSIS}"
59     SUBDIRS = {
60         'tif': OUTPUT_DIR / "01_GeoTIFF_2D",
61         'nc': OUTPUT_DIR / "02_NetCDF_Series",
62         'map': OUTPUT_DIR / "03_Cartografia_Hotspots_PNG",
63         'plt': OUTPUT_DIR / "04_Graficas_Tesis_PNG",
64         'log': OUTPUT_DIR / "05_Auditoria_QAQC"
65     }
66     for folder in SUBDIRS.values(): folder.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
67

```

```

68     def get_grid_definition(nc_path: Path):
69         """Extracts bounding_box, resolutions, and affine_structures from INEMA NetCDF
        ."""
70         ds = xr.open_dataset(nc_path)
71         lats, lons = ds['lat'].values, ds['lon'].values
72
73         # Normalize Longitudes (-180 to 180)
74         if np.max(lons) > 180: lons = np.where(lons > 180, lons - 360, lons)
75
76         res_lat, res_lon = abs(lats[1] - lats[0]), abs(lons[1] - lons[0])
77         west, north = np.min(lons) - (res_lon / 2.0), np.max(lats) + (res_lat / 2.0)
78         is_lat_asc = lats[0] < lats[-1]
79
80         grid_bbox = box(np.min(lons), np.min(lats), np.max(lons), np.max(lats))
81         return lats, lons, res_lat, res_lon, west, north, is_lat_asc, grid_bbox
82
83     def distribute_line_mass(geom, mass: float, matrix: np.ndarray, lats: np.
        ndarray, lons: np.ndarray, res_lat: float, res_lon: float, grid_bbox,
        route_label: str = None, debug: bool = False) -> np.ndarray:
84         """
85         =====Mathematical_Core: Intersects lines with raster grid cells.
86         =====Formula: Cell_Mass(i,j) = Sum((L_r,i,j)/L_r)*E_r
87         =====
88         if geom is None or geom.is_empty or mass <= 0:
89             return matrix
90
91         # Mitigate Coastal Edge Loss: Intersect geometry strictly within Grid Bounding
            Box
92         valid_geom = geom.intersection(grid_bbox)
93         if valid_geom.is_empty:
94             if debug:
95                 logging.warning(f"[Route_Debug] Route '{route_label}' has no intersection with
                    grid_bbox.")
96             return matrix
97
98         total_length = valid_geom.length
99         if total_length == 0:
100             if debug:
101                 logging.warning(f"[Route_Debug] Route '{route_label}' intersection length is
                    zero.")
102             return matrix
103
104         # Optimized Bounding Box Scanning
105         minx, miny, maxx, maxy = valid_geom.bounds
106         ix_min = max(0, np.argmin(np.abs(lons - minx)) - 2)
107         ix_max = min(len(lons)-1, np.argmin(np.abs(lons - maxx)) + 2)
108         iy_min = max(0, np.argmin(np.abs(lats - miny)) - 2)
109         iy_max = min(len(lats)-1, np.argmin(np.abs(lats - maxy)) + 2)
110         ix_lo, ix_hi = min(ix_min, ix_max), max(ix_min, ix_max)
111         iy_lo, iy_hi = min(iy_min, iy_max), max(iy_min, iy_max)
112
113         total_intersected_length = 0.0

```

```

114     for i in range(ix_lo, ix_hi + 1):
115     for j in range(iy_lo, iy_hi + 1):
116     cell_box = box(lons[i] - res_lon/2, lats[j] - res_lat/2, lons[i] + res_lon/2,
        lats[j] + res_lat/2)
117
118     if valid_geom.intersects(cell_box):
119     inter_len = valid_geom.intersection(cell_box).length
120     if inter_len > 0:
121     total_intersected_length += inter_len
122     fraction = inter_len / total_length
123     matrix[j, i] += mass * fraction
124
125     if debug:
126     frac = total_intersected_length / total_length if total_length > 0 else 0.0
127     if total_intersected_length == 0.0 or frac < 0.99:
128     logging.warning(
129     f"[Route_Debug]_Route_{route_label}_total_length={total_length:.6g},_"
130     f"intersected={total_intersected_length:.6g},_fraction={frac:.4f},_mass={mass
        :.6g}"
131     )
132     return matrix
133
134     def distribute_point_mass(lat: float, lon: float, mass: float, matrix: np.
        ndarray, lats: np.ndarray, lons: np.ndarray) -> np.ndarray:
135     """Injects Port/Maneuvering emissions strictly into a single focal cell (Point
        -to-Raster)."""
136     if mass <= 0 or pd.isna(lat) or pd.isna(lon): return matrix
137
138     # Clamping indices to prevent Edge Loss (Out of Bounds)
139     ix = max(0, min(len(lons) - 1, np.argmin(np.abs(lons - lon))))
140     iy = max(0, min(len(lats) - 1, np.argmin(np.abs(lats - lat))))
141
142     matrix[iy, ix] += mass
143     return matrix
144
145     def normalize_column_clause(name: str) -> str:
146     normalized = str(name).lower().replace('_2', '2').replace('_10', '10').replace
        ('_', '.')
147     normalized = re.sub(r'^0-9a-z+', '_', normalized)
148     normalized = re.sub(r'__+', '_', normalized).strip('_')
149     return normalized
150
151
152     def _has_exact_token(source: str, token: str) -> bool:
153     if not token:
154     return False
155     return re.search(r'(^|_)'+ re.escape(token) + r'(_|$)', source) is not None
156
157
158     def find_target_column(columns: list, pol: str, phase: str) -> str:
159     """Semantic scanner to extract exact column names for the given pollutant and
        phase."""

```

```

160     pol_clean = normalize_column_clause(pol)
161     phase_clean = normalize_column_clause(phase)
162
163     for c in columns:
164         c_clean = normalize_column_clause(c)
165         if not _has_exact_token(c_clean, phase_clean):
166             continue
167         if _has_exact_token(c_clean, pol_clean):
168             return c
169     return None
170
171
172     def extract_route_endpoints(geom):
173         """Return the first and last endpoint of a route geometry."""
174         if geom is None or geom.is_empty:
175             return []
176
177         endpoints = []
178         if geom.geom_type == 'LineString':
179             coords = list(geom.coords)
180             if coords:
181                 endpoints.append(Point(coords[0]))
182                 endpoints.append(Point(coords[-1]))
183             elif geom.geom_type == 'MultiLineString':
184                 if len(geom.geoms) > 0:
185                     first = geom.geoms[0]
186                     last = geom.geoms[-1]
187                     first_coords = list(first.coords)
188                     last_coords = list(last.coords)
189                     if first_coords:
190                         endpoints.append(Point(first_coords[0]))
191                     if last_coords:
192                         endpoints.append(Point(last_coords[-1]))
193             return endpoints
194
195
196     def _aggregate_matrix_over_geometry(geom, source_matrix, lats, lons, res_lat,
197                                         res_lon):
198         """Create an overlay mask from source matrix for cells intersecting the given
199             geometry."""
200         overlay = np.zeros_like(source_matrix)
201         if geom is None or geom.is_empty:
202             return overlay
203
204         minx, miny, maxx, maxy = geom.bounds
205         ix_min = max(0, np.argmin(np.abs(lons - minx)) - 2)
206         ix_max = min(len(lons) - 1, np.argmin(np.abs(lons - maxx)) + 2)
207         iy_min = max(0, np.argmin(np.abs(lats - miny)) - 2)
208         iy_max = min(len(lats) - 1, np.argmin(np.abs(lats - maxy)) + 2)
209         ix_lo, ix_hi = min(ix_min, ix_max), max(ix_min, ix_max)
210         iy_lo, iy_hi = min(iy_min, iy_max), max(iy_min, iy_max)

```

```

210     for i in range(ix_lo, ix_hi + 1):
211     for j in range(iy_lo, iy_hi + 1):
212     cell_box = box(lons[i] - res_lon / 2, lats[j] - res_lat / 2,
213     lons[i] + res_lon / 2, lats[j] + res_lat / 2)
214     if geom.intersects(cell_box):
215     value = source_matrix[j, i]
216     if value > 0:
217     overlay[j, i] = value
218     return overlay
219
220
221     def build_port_maneuvering_visual_matrix(M_Port: np.ndarray, M_Cruising: np.
222         ndarray, lats: np.ndarray, lons: np.ndarray,
223         res_lat: float, res_lon: float, gdf_crucero: gpd.GeoDataFrame,
224         gdf_ports: gpd.GeoDataFrame, port_search_radius: float = 0.08) -> np.ndarray:
225         """Build a visualization matrix that combines port mass with nearby route
226             tails."""
227         visual_matrix = M_Port.copy()
228         if gdf_ports is None or gdf_ports.empty or gdf_crucero is None or gdf_crucero.
229             empty:
230         return visual_matrix
231
232         port_points = list(gdf_ports.geometry)
233         for _, row in gdf_crucero.iterrows():
234         geom = row.geometry
235         if geom is None or geom.is_empty:
236         continue
237
238         endpoints = extract_route_endpoints(geom)
239         for endpoint in endpoints:
240         for port_point in port_points:
241         if endpoint.distance(port_point) <= port_search_radius:
242         tail_geom = geom.intersection(port_point.buffer(port_search_radius))
243         if tail_geom.is_empty:
244         continue
245         overlay = _aggregate_matrix_over_geometry(tail_geom, M_Cruising, lats, lons,
246             res_lat, res_lon)
247         visual_matrix += overlay
248         break
249         return visual_matrix
250
251     def render_academic_map(matrix: np.ndarray, pol: str, phase: str, lons: np.
252         ndarray, lats: np.ndarray, res_lon: float, res_lat: float, bg_gdf: gpd.
253         GeoDataFrame):
254         """Generates high-resolution heatmaps in English."""
255         west, north = np.min(lons) - (res_lon/2), np.max(lats) + (res_lat/2)
256         extent = [west, west + (matrix.shape[1] * res_lon), north - (matrix.shape[0] *
257             res_lat), north]
258
259         visual_matrix = gaussian_filter(matrix, sigma=0.6) if phase in ['Cruising', '
260             TOTAL'] else matrix
261         masked_data = np.ma.masked_where(visual_matrix <= VISUAL_FLOOR, visual_matrix)

```

```

254
255 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 14), facecolor='#0D1117', dpi=200)
256 ax.set_facecolor('#0D1117')
257
258 if bg_gdf is not None:
259     bg_gdf.plot(ax=ax, color='#1c2833', edgecolor='#4b6584', linewidth=0.5, zorder
        =1)
260
261 if masked_data.count() > 0:
262     vmax_val = float(masked_data.max())
263     vmin_val = max(VISUAL_FLOOR, float(masked_data.min()))
264 else:
265     vmax_val = 1.0
266     vmin_val = VISUAL_FLOOR
267
268 cmap = 'plasma' if phase == 'Cruising' else ('inferno' if phase == '
        Port_Maneuvering' else 'turbo')
269 norm = mcolors.LogNorm(vmin=vmin_val, vmax=vmax_val)
270
271 im = ax.imshow(masked_data, cmap=cmap, norm=norm, extent=extent, origin='upper
        ', alpha=1.0, zorder=2)
272
273 # Build decimal tick labels for the logarithmic colorbar
274 tick_values = np.geomspace(vmin_val, vmax_val, num=6)
275 tick_values = np.unique(np.round(tick_values, 10))
276 if len(tick_values) < 2:
277     tick_values = np.array([vmin_val, vmax_val])
278
279 cbar = plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.7, pad=0.04, ticks=tick_values)
280 cbar.set_label(f'{pol}_Mass_Flux_{UNIT_LABEL}/cell', color='white', fontsize
        =12, weight='bold')
281 cbar.ax.yaxis.set_tick_params(color='white', labelcolor='white')
282 cbar.ax.set_yticklabels([f"{x:.6f}".rstrip('0').rstrip('.') if x > 0 else '0.0
        ' for x in tick_values])
283 cbar.update_ticks()
284
285 ax.text(0.02, 0.06, f"Max_{vmax_val:.6f}_{UNIT_LABEL}/cell", transform=ax.
        transAxes,
286 color='white', fontsize=11, weight='bold', bbox=dict(facecolor='black', alpha
        =0.4, edgecolor='none', pad=4))
287
288 ax.set_xlim([-78.0, -66.0])
289 ax.set_ylim([-56.0, -17.0])
290 ax.tick_params(colors='white')
291 plt.xlabel('Longitude', color='white', fontsize=11, weight='bold')
292 plt.ylabel('Latitude', color='white', fontsize=11, weight='bold')
293
294 plt.title(f'Spatial_Disaggregation_of_Maritime_Emissions:{pol}\nPhase:{phase
        }_{YEAR_ANALYSIS}',
295 color='white', fontsize=14, weight='bold', pad=20)
296
297 plt.tight_layout()

```

```

298 plt.savefig(SUBDIRS['map'] / f"Map_{pol}_{phase}_{YEAR_ANALYSIS}.png",
299             facecolor='#0D1117')
300 plt.close()
301
302 def render_pareto_chart(df: pd.DataFrame, col_name: str, pol: str, phase: str,
303                        label_col: str):
304     """Renders academic Pareto Bar Charts for Top 10 Routes/Ports."""
305     if df.empty or col_name not in df.columns: return
306
307     df_clean = df.dropna(subset=[col_name]).copy()
308     df_sorted = df_clean.sort_values(by=col_name, ascending=False).head(10)
309
310     if df_sorted.empty or df_sorted[col_name].sum() == 0: return
311
312     plt.figure(figsize=(10, 6), dpi=150)
313     sns.barplot(data=df_sorted, x=col_name, y=label_col, palette=['#4c72b0'])
314
315     plt.title(f'Top 10 Most Polluting Maritime {phase}s - {pol} ({YEAR_ANALYSIS})',
316             , fontsize=14, weight='bold')
317     plt.xlabel(f'Emissions [{UNIT_LABEL}]', fontsize=12)
318     plt.ylabel(f'{phase} Identifier', fontsize=12)
319
320     # Add numerical labels to bars
321     for index, value in enumerate(df_sorted[col_name]):
322         plt.text(value, index, f'{value:.2f}', va='center', fontsize=10)
323
324     plt.tight_layout()
325     plt.savefig(SUBDIRS['plt'] / f"Pareto_{pol}_{phase}_{YEAR_ANALYSIS}.png")
326     plt.close()
327
328 def run_spatial_disaggregation():
329     logging.info(f"--- INITIATING MARITIME SPATIAL DISAGGREGATION ENGINE ({
330         YEAR_ANALYSIS}) ---")
331
332     # Validation
333     for p in [FILE_GPKG_MASTER, FILE_EXCEL_PORTS, FILE_INEMA_GRID,
334              FILE_EXCEL_ROUTES]:
335         if not p.exists(): logging.error(f"Missing File: {p.name}"); sys.exit(1)
336
337     lats, lons, res_lat, res_lon, west, north, is_lat_asc, grid_bbox =
338         get_grid_definition(FILE_INEMA_GRID)
339     transform = Affine.translation(west, north) * Affine.scale(res_lon, -res_lat)
340
341     logging.info("1. Ingesting Vectors and Port Nodes...")
342     gdf_crucero = gpd.read_file(FILE_GPKG_MASTER, layer="national_maritime_routes"
343                               )
344     logging.info(f"gdf_crucero CRS: {gdf_crucero.crs}")
345     # Reproject routes to WGS84 if necessary
346     try:
347         crs_epsg = gdf_crucero.crs.to_epsg() if gdf_crucero.crs is not None else None
348     except Exception:
349         crs_epsg = None

```



```

343     if crs_epsg is None:
344         logging.warning("gdf_crucero_has_no_CRS_defined._Proceeding_without_
            reprojection.")
345     elif crs_epsg != EPSG_WGS84:
346         logging.info(f"Reprojecting_gdf_crucero_from_EPSG:{crs_epsg}_to_EPSG:{
            EPSG_WGS84}")
347     gdf_crucero = gdf_crucero.to_crs(epsg=EPSG_WGS84)
348
349     df_routes_tabular = pd.read_excel(FILE_EXCEL_ROUTES)
350     df_ports = pd.read_excel(FILE_EXCEL_PORTS)
351     logging.info(f"df_ports_columns:_{df_ports.columns.tolist()}")
352
353     # Create a GeoDataFrame for ports when Latitud/Longitud exist (for CRS checks)
354     if 'Latitud' in df_ports.columns and 'Longitud' in df_ports.columns:
355         try:
356             gdf_ports = gpd.GeoDataFrame(df_ports.copy(), geometry=gpd.points_from_xy(
                df_ports['Longitud'], df_ports['Latitud']), crs=EPSG_WGS84)
357             logging.info("Created_gdf_ports_from_df_ports_with_EPSG:4326")
358         except Exception as e:
359             logging.warning(f"Failed_creating_gdf_ports:_{e}")
360             gdf_ports = None
361         else:
362             gdf_ports = None
363             logging.warning("Columns_'Latitud'/'Longitud'_not_found_in_df_ports;_point_
                GeoDataFrame_not_created.")
364
365     try:
366         chile_gdf = gpd.read_file(URL_CHILE_GEOJSON)
367         if chile_gdf is not None and getattr(chile_gdf, 'crs', None) is not None:
368             try:
369                 if chile_gdf.crs.to_epsg() != EPSG_WGS84:
370                     chile_gdf = chile_gdf.to_crs(epsg=EPSG_WGS84)
371             except Exception:
372                 pass
373             except Exception as e:
374                 logging.warning(f"Could_not_fetch_Chile_geojson:_{e}")
375                 chile_gdf = None
376
377     audit_log = []
378     pollutants = DEBUG_POLLUTANTS if DEBUG_POLLUTANTS else POLLUTANT_SELECTION
379
380     for pol in pollutants:
381         logging.info(f"\n>>_EXECUTING_SPATIAL_ALGEBRA_FOR:_{pol}_<<")
382
383         # Matrix Initialization (Float64 to eradicate truncation)
384         M_Cruising = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=np.float64)
385         M_Port = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=np.float64)
386
387         col_cru = find_target_column(gdf_crucero.columns, pol, 'crucero')
388         col_port = find_target_column(df_ports.columns, pol, 'puerto')
389
390         mass_cru_target = gdf_crucero[col_cru].sum() if col_cru else 0.0

```

```

391 mass_port_target = df_ports[col_port].sum() if col_port else 0.0
392 total_target = mass_cru_target + mass_port_target
393
394 logging.info(f"Detected_columns_{col_cru}:{col_cru},{col_port}:{col_port}")
395 logging.info(f"Mass_targets_{Cruising}:{mass_cru_target:.6g},{Port}:{mass_port_target:.6g},{Total}:{total_target:.6g}")
396
397 if total_target == 0:
398     logging.warning(f"No_mass_found_for_{pol}.Skipping_iteration.")
399     continue
400
401 # -----
402 # A. RASTERIZATION: CRUISING PHASE (Mathematical Length Fraction)
403 # -----
404 logging.info(f">Voxelizing_Cruising_Phase_(Line-to-Raster_Intersection)...")
405 if col_cru:
406     for idx, row in gdf_crucero.iterrows():
407         geom = row.geometry
408         mass = row[col_cru]
409         route_label = f"idx={idx}"
410         if col_cru in gdf_crucero.columns and len(gdf_crucero.columns) > 0:
411             route_label = f"idx={idx},{gdf_crucero.columns[0]}={row[gdf_crucero.columns[0]]}"
412         M_Cruising = distribute_line_mass(
413             geom, mass, M_Cruising, lats, lons, res_lat, res_lon, grid_bbox,
414             route_label=route_label,
415             debug=(pol in DEBUG_POLLUTANTS)
416         )
417         logging.info(f"{pol}_Cruising_sum={M_Cruising.sum():.6g},{non-zero}={np.count_nonzero(M_Cruising)}")
418
419 # -----
420 # B. RASTERIZATION: PORT & MANEUVERING PHASE (Point Injection)
421 # -----
422 logging.info(f">Voxelizing_Port_Phase_(Point-to-Raster_Injection)...")
423 if col_port and 'Latitud' in df_ports.columns and 'Longitud' in df_ports.columns:
424     for _, row in df_ports.iterrows():
425         M_Port = distribute_point_mass(row['Latitud'], row['Longitud'], row[col_port],
426                                         M_Port, lats, lons)
427         logging.info(f"{pol}_Port_sum={M_Port.sum():.6g},{non-zero}={np.count_nonzero(M_Port)}")
428
429 # -----
430 # C. KAPPA CORRECTION & QAQC (Conservation of Mass)
431 # -----
432 M_Total = M_Cruising + M_Port
433 allocated_mass = np.sum(M_Total)
434 delta_mass = abs(total_target - allocated_mass)
435
436 logging.info(f"{pol}_Allocated_mass_(sum_matrix)={allocated_mass:.6g},{delta}_{delta_mass:.6g},{non-zero_cells}={np.count_nonzero(M_Total)}")

```

```

436
437     status = "PERFECT"
438     if delta_mass > EPSILON_AUDIT and allocated_mass > 0:
439         logging.warning(f"_{pol}]_Edge_loss_detected_{delta_mass:.5f}_Gg)._
            Applying_Kappa_scaling.")
440     kappa = total_target / allocated_mass
441     M_Total *= kappa
442     M_Cruising *= kappa
443     M_Port *= kappa
444     allocated_mass = np.sum(M_Total)
445     status = "APPROVED_(Kappa_Corrected)"
446
447     audit_log.append({
448         'Pollutant': pol,
449         'Target_Gg': total_target,
450         'Allocated_Gg': allocated_mass,
451         'Absolute_Error_Gg': abs(total_target - allocated_mass),
452         'QAQC_Status': status
453     })
454
455     # -----
456     # D. MULTI-FORMAT EXPORT ENGINE
457     # -----
458     logging.info(f"_{pol}]_Exporting_GeoTIFFs,_NetCDFs,_and_Pareto_Charts...")
459     matrices = {'Cruising': M_Cruising, 'Port_Maneuvering': M_Port, 'TOTAL':
        M_Total}
460
461     for phase, matrix in matrices.items():
462         # 1. NetCDF Multidimensional
463         da = xr.DataArray(matrix.astype(np.float32), coords={'lat': lats, 'lon': lons
            }, dims=('lat', 'lon'), name=f"{pol}_{phase}")
464         da.to_netcdf(SUBDIRS['nc'] / f"MARITIME_{pol}_{phase}_{YEAR_ANALYSIS}.nc")
465
466         # 2. GeoTIFF
467         m_tif = np.flipud(matrix.astype(np.float32)) if is_lat_asc else matrix.astype(
            np.float32)
468         with rasterio.open(SUBDIRS['tif'] / f"MARITIME_{pol}_{phase}_{YEAR_ANALYSIS}.
            tif", 'w', driver='GTiff',
469             height=m_tif.shape[0], width=m_tif.shape[1], count=1, dtype=str(m_tif.dtype),
470             crs=EPSG_WGS84, transform=transform, compress='lzv', nodata=0.0) as dst:
471             dst.write(m_tif, 1)
472
473         # 3. High-Res Cartography
474         render_matrix = matrix
475         if phase == 'Port_Maneuvering':
476             render_matrix = build_port_maneuvering_visual_matrix(
477                 M_Port, M_Cruising, lats, lons, res_lat, res_lon,
478                 gdf_crucero, gdf_ports
479             )
480         render_academic_map(render_matrix, pol, phase, lons, lats, res_lon, res_lat,
            chile_gdf)
481

```

```

482     # 4. Pareto Charts
483     if col_cru: render_pareto_chart(df_routes_tabular, col_cru, pol, 'Route',
484                                   df_routes_tabular.columns[0])
485     if col_port: render_pareto_chart(df_ports, col_port, pol, 'Port', 'PUERTO')
486
487     # Master Audit Dump
488     df_audit = pd.DataFrame(audit_log)
489     df_audit.to_excel(SUBDIRS['log'] / f"Spatial_Mass_Balance_Audit_{YEAR_ANALYSIS}
490                       }.xlsx", index=False)
491
492     print("\n" + "="*85)
493     print("CONSERVATION_OF_MASS_CERTIFICATE_(INEMA_GRID):")
494     print(df_audit[['Pollutant', 'Target_Gg', 'Absolute_Error_Gg', 'QAQC_Status'
495                     ]].to_string(index=False))
496     print("="*85 + "\n")
497
498     if __name__ == "__main__":
499         run_spatial_disaggregation()

```

## A.2. Código de Procesamiento de Emisiones Terrestres

La desagregación espacial de las emisiones del sector transporte terrestre representa por su parte un desafío enorme y vasto en términos de carga computacional y complejidad algorítmica, debido a la inmensa capilaridad de la red vial nacional. El siguiente script en Python detalla la metodología de rasterización ( conocida como *Line-to-Raster Intersection*) aplicada para distribuir los inventarios tabulares a nivel comunal y regional hacia la grilla de alta resolución espacial deseada. Este algoritmo desarrollado implementa un modelo de asignación basado en jerarquías viales (*proxy* espacial) siguiendo las siguientes directrices programadas:

- **Ámbito Urbano vs. Interurbano:** El inventario se segmenta estructuralmente en dos dominios principales. Para el ámbito interurbano, el peso de asignación de emisiones depende en gran medida de la clasificación técnica de la vía (Autopistas, Rutas Primarias, Secundarias, etc.), asumiendo ciertas características y patrones propios de cada tipo de vía. En contraste, el ámbito urbano es significativamente más complejo y el peso asignado a cada tipo de calle (Troncal, Residencial, etc.) varía dinámicamente según la categorización sociodemográfica de la ciudad que atraviesa, utilizando matrices de pesos pre-calculadas (las cuales en el algoritmo se detallan en PESOS\_CIUDADES\_PATH).
- **Paralelización de Geometría Espacial:** Dada la densidad de la red vial (es-

pecialmente en la Región Metropolitana), el cálculo iterativo de intersecciones geométricas de cientos de miles de segmentos contra las celdas de la grilla resulta prohibitivo en tiempo de ejecución secuencial. El código soluciona este cuello de botella implementando multiprocesamiento simétrico a través de la librería `concurrent.futures`, distribuyendo la carga de trabajo regional (Shapes URB e INT) entre los núcleos lógicos de la CPU (`ProcessPoolExecutor`).

- **Precisión Geométrica en la Intersección:** Con la finalidad de asegurar la conservación de la masa, la longitud del segmento de ruta que interseca una celda específica se calcula con precisión geodésica. La longitud nativa en grados decimales (EPSG:4686) se proyecta localmente a metros utilizando la corrección coseno-latitudinal en la celda correspondiente:

$$Longitud(m) = Longitud(grados) \times 111320 \times \cos\left(\frac{\pi \times Latitud_{media}}{180}\right)$$

Esta métrica lo que hace básicamente es que define la fracción de masa de emisión que será depositada finalmente en el píxel de la matriz `grid_reg`.

El código elaborado culmina exportando los resultados consolidados en formato GeoTIFF y NetCDF para modelación, junto con una extensa batería de gráficos analíticos (mapas de calor y barras apiladas) que ayudan a perfilar la contribución regional y categórica del parque automotriz.

#### Desagregacion\_Espacial\_Terrestre.py

```

1      import os
2      import shutil
3      import warnings
4      import unicodedata
5      import numpy as np
6      import pandas as pd
7      import geopandas as gpd
8      import xarray as xr
9      import rasterio
10     import matplotlib.pyplot as plt
11     import matplotlib.ticker as ticker
12     import matplotlib.colors as mcolors
13     from shapely.geometry import box
14     from rasterio.transform import from_bounds
15     from rasterio.crs import CRS
16     from concurrent.futures import ProcessPoolExecutor, as_completed
17     from multiprocessing import freeze_support
18

```

```

19 # --- Configuración Visual ---
20 warnings.filterwarnings('ignore')
21 plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
22 plt.rcParams.update({
23     'font.family': 'sans-serif',
24     'font.sans-serif': ['Arial', 'DejaVu_Sans'],
25     'font.size': 11,
26     'axes.titlesize': 14,
27     'axes.titleweight': 'bold',
28     'axes.edgecolor': '#333333',
29     'grid.alpha': 0.5,
30     'figure.autolayout': True
31 })
32
33 PROJECTION = "EPSG:4686"
34 BASE_DIR = "C:/Users/david/Desktop/David_Bevilacqua_Files/python1"
35
36 PESOS_CIUDADES_PATH = os.path.join(BASE_DIR, "Inputs", "Ciudades_Pesos.xlsx")
37 PESOS_INTERURB_PATH = os.path.join(BASE_DIR, "Inputs", "Pesos_rutas_int.xlsx")
38 EMISIONES_PATH = os.path.join(BASE_DIR, "Inputs", "Emisiones_2024-2050_
    _desagregacion.xlsx")
39 GRILLA_NETCDF_PATH = os.path.join(BASE_DIR, "Inputs", "inema-2.0_CO2_1A4b_0
    .01x0.01_2015.nc")
40 SHAPES_DIR_URB = os.path.join(BASE_DIR, "Rutas_urbanas")
41 SHAPES_DIR_INT = os.path.join(BASE_DIR, "Rutas_interurbanas")
42
43 HIGHWAY_TO_PESOS_MAP_URB = {
44     'motorway': 'trunk', 'trunk': 'trunk', 'primary': 'primary',
45     'primary_link': 'primary', 'secondary': 'secondary', 'secondary_link':
        'secondary',
46     'tertiary': 'tertiary', 'tertiary_link': 'tertiary', 'track': '
        tertiary',
47     'residential': 'residential', 'living_street': 'residential', '
        unclassified': 'residential',
48     'service': 'residential', 'road': 'residential', 'path': 'residential'
        ,
49     'footway': 'residential', 'cycleway': 'residential'
50 }
51
52 # Separación de MOT (Motos)
53 CATEGORY_MAP_URB = {
54     'VLP': ["VLC", "VLP"], 'MOT': ["MOT"], 'TAX': ["TAX"],
55     'BUS': ["BUS_RIG", "BUS_ART"], 'CAM': ["CAM_LIV", "CAM_MED", "CAM_PES"]
56     ]
57 }
58 CATEGORY_MAP_INT = {
59     'VLP': ["VLC", "VLP"], 'MOT': ["MOT"], 'TAX': [],
60     'BUS': ["BUS_INT_PROV"], 'CAM': ["CAM_LIV", "CAM_MED", "CAM_PES"]
61 }
62
63 def parse_years_input(input_str):

```

```

64     years = set()
65     parts = input_str.split(',')
66     for part in parts:
67         part = part.strip()
68         if '-' in part:
69             try:
70                 start, end = map(int, part.split('-'))
71                 years.update(range(start, end + 1))
72             except ValueError: pass
73         else:
74             try: years.add(int(part))
75             except ValueError: pass
76     return sorted(list(years))
77
78     def get_shapefile_era(year):
79         if year > 2018: return 3
80         elif 2007 < year <= 2018: return 2
81         else: return 1
82
83     def normalize_commune_name(name):
84         if not isinstance(name, str): return ""
85         try:
86             norm = unicodedata.normalize('NFKD', name)
87             norm = ''.join([c for c in norm if not unicodedata.combining(c)])
88             norm = norm.lower().strip()
89             mapping = {'santiago_centro': 'santiago', 'stgo': 'santiago'}
90             return mapping.get(norm, norm)
91         except: return ""
92
93     def get_city_weights(name, c_type, h_type, c_weights, c_defaults):
94         key = normalize_commune_name(name)
95         weights = c_weights.get(key)
96         if not weights:
97             fallback_key = "cmt" if h_type in ["trunk", "motorway"] and c_type == "CM"
98             else ("cm" if c_type == "CM" else "c")
99             weights = c_defaults.get(fallback_key)
100         if not weights or h_type not in weights:
101             return {'VLP': 0, 'TAXI': 0, 'BUS': 0, 'CAM': 0, 'MOT': 0}
102         w = weights[h_type]
103         # Lectura explícita de MOT
104         return {'VLP': w.get('VLP', 0), 'TAXI': w.get('TAXI', 0), 'BUS': w.get('BUS',
105             0), 'CAM': w.get('CAMIONES', 0), 'MOT': w.get('MOT', 0)}
106
107     def preprocess_emissions_data(excel_path):
108         if not os.path.exists(excel_path): raise FileNotFoundError(f"Archivo no_
109             encontrado: {excel_path}")
110         print("Cargando base de emisiones...")
111         try:
112             xls_dict = pd.read_excel(excel_path, sheet_name=None)
113             processed_data = {}
114             for sheet_name, df in xls_dict.items():
115                 if sheet_name == 'Tendencias': continue

```

```

113     if 'Region' in df.columns: df['Region'] = df['Region'].astype(str).str.replace
114         ('R0', 'R').str.strip()
115     for col in [c for c in df.columns if str(c).isdigit() and len(str(c)) == 4]:
116         df[col] = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce').fillna(0)
117     processed_data[sheet_name] = df
118     return processed_data
119
120     except Exception as e: raise RuntimeError(f"Error crítico al leer Excel: {e}")
121
122     def get_emission_value(df, anio, categoria, ambito, region_str):
123         col_anio = anio if anio in df.columns else str(anio)
124         if col_anio not in df.columns: return 0.0
125         map_cat = CATEGORY_MAP_URB if ambito == "Urbano" else CATEGORY_MAP_INT
126         sub_cats = map_cat.get(categoria.upper(), [])
127         if not sub_cats: return 0.0
128         mask = (df['Ambito'] == ambito) & (df['Categoria'].isin(sub_cats)) & (df['
129             Region'] == region_str)
130         return df.loc[mask, col_anio].sum()
131
132     def load_and_merge_shapes(region_num, anno, shape_dir):
133         def _load(r):
134             try:
135                 gdf = gpd.read_file(os.path.join(shape_dir, f"Curbano_{r}.shp"), encoding='
136                     latin1')
137                 if gdf.crs != PROJECTION: gdf.set_crs(PROJECTION, allow_override=True, inplace
138                     =True)
139                 return gdf
140             except: return None
141         gdfs = []
142         if anno > 2018: gdfs.append(_load(region_num))
143         elif 2007 < anno < 2019:
144             if region_num == 8: gdfs.extend([_load(8), _load(16)])
145             elif region_num != 16: gdfs.append(_load(region_num))
146             elif anno <= 2007:
147                 map_old = {1:[1,15], 10:[10,14], 8:[8,16]}
148                 if region_num in map_old: gdfs.extend([_load(x) for x in map_old[region_num]])
149                 elif region_num not in [14,15,16]: gdfs.append(_load(region_num))
150                 valid = [g for g in gdfs if g is not None and not g.empty]
151                 return pd.concat(valid, ignore_index=True) if valid else None
152
153         def calculate_proxy_urban(gdf, grid_info, city_weights, city_defaults,
154             region_id):
155             try:
156                 rows, cols, bounds = grid_info['rows'], grid_info['cols'], grid_info['bounds']
157                 grids = {k: np.zeros((rows, cols), dtype=np.float32) for k in ['VLP', 'TAX', '
158                     BUS', 'CAM', 'MOT']}
159                 lon_edges = np.linspace(bounds[0], bounds[2], cols + 1)
160                 lat_edges = np.linspace(bounds[1], bounds[3], rows + 1)
161
162                 col_hwy = next((c for c in ['highway', 'fclass', 'type'] if c in gdf.columns),
163                     None)
164                 if not col_hwy: return None
165                 cache_w = {}

```



```

158
159     for _, row in gdf.iterrows():
160         geom = row.geometry
161         if geom is None or geom.is_empty: continue
162         h_osm = row.get(col_hwy)
163         h_pesos = HIGHWAY_TO_PESOS_MAP_URB.get(h_osm)
164         comuna, t_city = row.get('SHP_Comuna'), row.get('Tipo_City')
165         if not comuna or not h_pesos: continue
166         key = (comuna, t_city, h_pesos)
167         if key not in cache_w: cache_w[key] = get_city_weights(comuna, t_city, h_pesos
168             , city_weights, city_defaults)
169         w_vals = cache_w[key]
170
171         min_x, min_y, max_x, max_y = geom.bounds
172         j_s = max(0, int((min_x - bounds[0]) / grid_info['res_lon']))
173         j_e = min(cols - 1, int((max_x - bounds[0]) / grid_info['res_lon']))
174         i_s = max(0, int((min_y - bounds[1]) / grid_info['res_lat']))
175         i_e = min(rows - 1, int((max_y - bounds[1]) / grid_info['res_lat']))
176
177         for j in range(j_s, j_e + 1):
178             for i in range(i_s, i_e + 1):
179                 cell = box(lon_edges[j], lat_edges[i], lon_edges[j+1], lat_edges[i+1])
180                 if geom.intersects(cell):
181                     length = geom.intersection(cell).length * 111320 * np.cos(np.radians((
182                         lat_edges[i]+lat_edges[i+1])/2))
183                     row_idx = (rows - 1) - i
184                     for k in grids: grids[k][row_idx, j] += length * w_vals.get(k, 0)
185                     return {k: (v / np.sum(v) if np.sum(v) > 0 else v) for k, v in grids.items()}
186             except: return None
187
188     def calculate_proxy_interurban(gdf, grid_info, w_dict, region_id):
189         try:
190             rows, cols, bounds = grid_info['rows'], grid_info['cols'], grid_info['bounds']
191             grid = np.zeros((rows, cols), dtype=np.float32)
192             lon_edges = np.linspace(bounds[0], bounds[2], cols + 1)
193             lat_edges = np.linspace(bounds[1], bounds[3], rows + 1)
194             mapa_t = {'primary': 'Primaria', 'secondary': 'Secundaria', 'tertiary': '
195                 Terciaria', 'motorway': 'Autopistas', 'trunk': 'Autovias'}
196
197             for _, row in gdf.iterrows():
198                 tipo = mapa_t.get(row.get("highway"))
199                 if tipo not in w_dict: continue
200                 peso = w_dict[tipo]
201                 geom = row.geometry
202                 if geom.is_empty: continue
203                 min_x, min_y, max_x, max_y = geom.bounds
204                 j_s = max(0, int((min_x - bounds[0]) / grid_info['res_lon']))
205                 j_e = min(cols - 1, int((max_x - bounds[0]) / grid_info['res_lon']))
206                 i_s = max(0, int((min_y - bounds[1]) / grid_info['res_lat']))
207                 i_e = min(rows - 1, int((max_y - bounds[1]) / grid_info['res_lat']))
208                 for j in range(j_s, j_e + 1):
209                     for i in range(i_s, i_e + 1):

```

```

207     cell = box(lon_edges[j], lat_edges[i], lon_edges[j+1], lat_edges[i+1])
208     if geom.intersects(cell):
209         length = geom.intersection(cell).length * 111320 * np.cos(np.radians((
                lat_edges[i]+lat_edges[i+1])/2))
210     grid[(rows - 1) - i, j] += length * peso
211     total = np.sum(grid)
212     return grid / total if total > 0 else grid
213 except: return None
214
215 def wrapper_urb(r, anno, g_info, w_city, w_def):
216     gdf = load_and_merge_shapes(r, anno, SHAPES_DIR_URB)
217     return r, (calculate_proxy_urban(gdf, g_info, w_city, w_def, r) if gdf is not
                None else None)
218
219 def wrapper_int(r, g_info, w_int_df):
220     try:
221         gdf = gpd.read_file(os.path.join(SHAPES_DIR_INT, f"{r}.shp")).set_crs(
                PROJECTION, allow_override=True)
222     except: return r, None
223
224
225 def create_year_detail_chart(data, pol, year, out_path):
226     """Barras agrupadas (Detalle fino)"""
227     if not data: return
228     cats = sorted({c for r in data.values() for c in r.keys()})
229     regs = sorted([r for r in data.keys()])
230     bold_colors = plt.cm.tab10(np.linspace(0, 1, 10))
231
232     fig, ax = plt.subplots(figsize=(max(12, len(regs)*1.5), 8))
233     x = np.arange(len(regs))
234     width = 0.85 / len(cats)
235
236     for i, cat in enumerate(cats):
237         vals = [data.get(r, {}).get(cat, 0) for r in regs]
238         # Filtro de categorias vacias
239         if not any(v > 0.0001 for v in vals): continue
240
241         offset = (i - len(cats)/2) * width + width/2
242         bars = ax.bar(x + offset, vals, width, label=cat, color=bold_colors[i % 10],
                edgecolor='white')
243
244         # Etiquetas verticales solo si la barra es relevante
245         max_v = max(vals)
246         for bar in bars:
247             h = bar.get_height()
248             if h > max_v * 0.02:
249                 ax.annotate(f'{h:.1f}' if h >= 10 else f'{h:.2f}',
250                     xy=(bar.get_x() + bar.get_width()/2, h), xytext=(0, 3),
251                     textcoords="offsetpoints", ha='center', va='bottom', rotation=90, fontsize=8)
252
253     ax.set_ylabel("Emisiones (Gg)", fontweight='bold')

```

```

254     ax.set_title(f"Detalle_Regional_{pol}_{year}", pad=20)
255     ax.set_xticks(x)
256     ax.set_xticklabels([f"R{r}" for r in regs], fontweight='bold')
257     ax.legend(bbox_to_anchor=(1.01, 1), loc="upper_left", title="Cat/Ambito")
258     plt.tight_layout()
259     plt.savefig(out_path, dpi=300)
260     plt.close()
261
262     def create_stacked_regional_chart(data, pol, year, out_path):
263         """
264         [NUEVO] Grafico de Barras Apiladas (Composicion Regional).
265         Muestra el total por region dividido en categorias.
266         """
267         if not data: return
268         regs = sorted([r for r in data.keys()])
269         # Agrupar subcategorias (ej: VLP_Urb + VLP_Int -> VLP) para simplificar la
270         # vista
271         cats_simplified = set()
272         for r_data in data.values():
273             for k in r_data.keys():
274                 cats_simplified.add(k.split('_')[0]) # Toma el prefijo (VLP, CAM, etc)
275                 cats_simplified = sorted(list(cats_simplified))
276
277         # Preparar datos agregados
278         stacked_data = {cat: [] for cat in cats_simplified}
279         for r in regs:
280             for cat in cats_simplified:
281                 val_urb = data.get(r, {}).get(f"{cat}_Urb", 0)
282                 val_int = data.get(r, {}).get(f"{cat}_Int", 0)
283                 stacked_data[cat].append(val_urb + val_int)
284
285         fig, ax = plt.subplots(figsize=(max(10, len(regs)*1.2), 7))
286         bottom_vals = np.zeros(len(regs))
287         colors = plt.cm.Set2(np.linspace(0, 1, len(cats_simplified)))
288
289         for i, cat in enumerate(cats_simplified):
290             vals = np.array(stacked_data[cat])
291             if np.sum(vals) == 0: continue
292             ax.bar(regs, vals, bottom=bottom_vals, label=cat, color=colors[i], edgecolor='
293                 white', alpha=0.9)
294             bottom_vals += vals
295
296         ax.set_ylabel("Emisiones_Totales_(Gg)", fontweight='bold')
297         ax.set_title(f"Composicion de Emisiones por Region_{pol}_{year}", pad=15)
298         ax.set_xticks(regs)
299         ax.set_xticklabels([f"R{r}" for r in regs], fontweight='bold')
300         ax.legend(title="Categoria", bbox_to_anchor=(1.01, 1), loc="upper_left")
301         plt.tight_layout()
302         plt.savefig(out_path, dpi=300)
303         plt.close()
304
305     def create_heatmap_contribution(data, pol, year, out_path):

```

```

304         """
305         [NUEVO].Heatmap_Matricial_(Region_vs_Categoria).
306         Muestra la intensidad de emisiones para identificar hotspots.
307         """
308         if not data: return
309         regs = sorted([r for r in data.keys()])
310         # Usamos categorias completas (VLP_Urb, VLP_Int...) o simplificadas. Probemos
311         # simplificadas para claridad.
312         cats_simp = sorted(list({k.split('_')[0] for r in data.values() for k in r.
313                                keys()}))
314
315         matrix = []
316         for r in regs:
317             row = []
318             for cat in cats_simp:
319                 val = data.get(r, {}).get(f"{cat}_Urb", 0) + data.get(r, {}).get(f"{cat}_Int",
320                                                                                   0)
321             row.append(val)
322             matrix.append(row)
323
324         matrix = np.array(matrix)
325         if np.sum(matrix) == 0: return
326
327         fig, ax = plt.subplots(figsize=(len(cats_simp)*1.5, len(regs)*0.6 + 2))
328         im = ax.imshow(matrix, cmap='YlOrRd', aspect='auto') # Amarillo a Rojo
329
330         # Etiquetas ejes
331         ax.set_xticks(np.arange(len(cats_simp)))
332         ax.set_yticks(np.arange(len(regs)))
333         ax.set_xticklabels(cats_simp, fontweight='bold')
334         ax.set_yticklabels([f"R{r}" for r in regs], fontweight='bold')
335
336         # Anotar valores
337         for i in range(len(regs)):
338             for j in range(len(cats_simp)):
339                 val = matrix[i, j]
340                 color = "white" if val > np.max(matrix)/2 else "black"
341                 if val > 0.01:
342                     ax.text(j, i, f"{val:.1f}", ha="center", va="center", color=color, fontsize=9)
343
344         ax.set_title(f"Matriz de Intensidad (Gg):_{pol}_{year}", pad=20)
345         cbar = ax.figure.colorbar(im, ax=ax)
346         cbar.ax.set_ylabel("Emisiones (Gg)", rotation=-90, va="bottom")
347         plt.tight_layout()
348         plt.savefig(out_path, dpi=300)
349         plt.close()
350
351         def create_temporal_plots(global_stats, out_dir):
352             """Graficos de Tendencia (Lineas + Normalizado)"""
353             os.makedirs(out_dir, exist_ok=True)
354             # 1. Evolucion Individual
355             for pol, data in global_stats.items():

```

```

353     years = sorted(data.keys())
354     vals = [data[y] for y in years]
355     if len(years) < 2: continue
356     plt.figure(figsize=(10, 6))
357     plt.plot(years, vals, '-o', linewidth=2, color='#1f77b4')
358     plt.title(f"Evolucion_Historica_{pol}")
359     plt.ylabel("Gg"); plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
360     plt.gca().xaxis.set_major_locator(ticker.MaxNLocator(integer=True))
361     plt.savefig(os.path.join(out_dir, f"Evolucion_{pol.replace('.', '')}.png"), dpi
362                 =300)
363     plt.close()
364
365     # 2. Normalizado
366     years_all = set()
367     for d in global_stats.values(): years_all.update(d.keys())
368     if len(years_all) < 2: return
369     start_year = sorted(list(years_all))[0]
370
371     plt.figure(figsize=(12, 8))
372     for pol, data in global_stats.items():
373         base = data.get(start_year, 0)
374         if base == 0: continue
375         ys = sorted(data.keys())
376         norm = [data[y]/base for y in ys]
377         plt.plot(ys, norm, '-o', label=pol, linewidth=2)
378
379     plt.axhline(1, color='gray', linestyle='--')
380     plt.title(f"Tendencia_Normalizada_(Base_{start_year}=1.0)")
381     plt.legend(); plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.3)
382     plt.gca().xaxis.set_major_locator(ticker.MaxNLocator(integer=True))
383     plt.savefig(os.path.join(out_dir, "COMPARATIVA_NORMALIZADA.png"), dpi=300)
384     plt.close()
385
386     if __name__ == '__main__':
387         freeze_support()
388         print("\n" + "="*80)
389         print("_SISTEMA_DE_EMISIONES_CHILE_ESTRUCTURADO_Y_AVANZADO")
390         print("_Salidas:_/NetCDF,_/GeoTIFF,_/Graficos,_/Reportes")
391         print("="*80 + "\n")
392
393         # Inputs
394         try:
395             y_in = input("Ingrese_Ano(s)_ (ej:_2023_o_2020-2024):_")
396             years_list = parse_years_input(y_in)
397             if not years_list: raise ValueError
398             c_in = input("Categorias_(ej:_VLP,MOT_o_'todas'):_").strip().lower()
399             sel_cats = ['VLP', 'TAX', 'BUS', 'CAM', 'MOT'] if c_in == 'todas' else [x.
400                                     upper().strip() for x in c_in.split(',')]]
401             run_name_base = input("Nombre_base_para_resultados:_").strip()
402             except: exit("Error_en_inputs.")

```

```

403 SEL_REGIONS = list(range(1, 17))
404
405 # Carga Inicial
406 print("\n---1. Inicializacion---")
407 emissions_db = preprocess_emissions_data(EMISIONES_PATH)
408
409 ds_base = xr.open_dataset(GRILLA_NETCDF_PATH)
410 lats, lons = ds_base['lat'].values, ds_base['lon'].values
411 res_lat, res_lon = abs(lats[1]-lats[0]), abs(lons[1]-lons[0])
412 grid_info = {'rows': len(lats), 'cols': len(lons), 'bounds': (lons.min()-
    res_lon/2, lats.min()-res_lat/2, lons.max()+res_lon/2, lats.max()+res_lat
    /2), 'res_lat': res_lat, 'res_lon': res_lon}
413
414 p_ciudades = pd.read_excel(PESOS_CIUDADES_PATH)
415 dict_ciudades = {}
416 for _, r in p_ciudades.iterrows():
417     c = normalize_commune_name(r['Ciudad'])
418     if c:
419         if c not in dict_ciudades: dict_ciudades[c] = {}
420         dict_ciudades[c][r['Ruta']] = {'VLP':r['VLP'], 'TAXI':r['TAXI'], 'BUS':r['BUS'],
            'CAMIONES':r['CAMIONES'], 'MOT':r['MOT']}
421         dict_defaults = {'c': dict_ciudades.get('c',{}), 'cm': dict_ciudades.get('cm',
            {},{}), 'cmt': dict_ciudades.get('cmt',{})}
422
423 p_int = pd.read_excel(PESOS_INTERURB_PATH, skiprows=1, header=None).iloc[:,
    1:6]
424 p_int.columns = ['Primaria', 'Secundaria', 'Terciaria', 'Autopistas', '
    Autovias']
425
426 proxies_cache = {}
427 global_temporal_stats = {}
428 global_excel_report = {}
429
430 # Ejecucion
431 print("\n---2. Procesamiento---")
432 for anno in years_list:
433     print(f"\nANO_{anno}")
434
435 # Geometria
436 era = get_shapefile_era(anno)
437 if era in proxies_cache: proxies_urb, proxies_int = proxies_cache[era]['urb'],
    proxies_cache[era]['int']
438 else:
439     print(f"Calculando geometria(Era_{era})...")
440     proxies_urb, proxies_int = {}, {}
441     with ProcessPoolExecutor() as exe:
442         fu = {exe.submit(wrapper_urb, r, anno, grid_info, dict_ciudades, dict_defaults
            ): r for r in SEL_REGIONS}
443         fi = {exe.submit(wrapper_int, r, grid_info, p_int): r for r in SEL_REGIONS}
444         for f in as_completed(fu):
445             r, res = f.result()
446             if res: proxies_urb[r] = res

```

```

447     for f in as_completed(fi):
448         r, res = f.result()
449         if res is not None: proxies_int[r] = res
450         proxies_cache[era] = {'urb': proxies_urb, 'int': proxies_int}
451
452     # --- CREACION DE ESTRUCTURA DE CARPETAS ---
453     base_yr_dir = os.path.join(run_name_base, str(anno))
454     dir_tif = os.path.join(base_yr_dir, "GeoTIFF")
455     dir_nc = os.path.join(base_yr_dir, "NetCDF")
456     dir_img = os.path.join(base_yr_dir, "Graficos")
457     dir_rep = os.path.join(base_yr_dir, "Reportes")
458
459     for d in [dir_tif, dir_nc, dir_img, dir_rep]: os.makedirs(d, exist_ok=True)
460
461     meta = {'driver': 'GTiff', 'height': grid_info['rows'], 'width': grid_info['cols'], 'count': 1, 'dtype': 'float32', 'crs': CRS.from_string(PROJECTION), 'transform': from_bounds(*grid_info['bounds'], grid_info['cols'], grid_info['rows']), 'nodata': 0, 'compress': 'lzw'}
462
463     plot_data_year = {}
464
465     for pol in emissions_db.keys():
466         pol_clean = pol.replace('.', '').replace('_', '')
467         if pol not in global_temporal_stats: global_temporal_stats[pol] = {}
468         if pol not in global_excel_report: global_excel_report[pol] = []
469
470         plot_data_year[pol] = {}
471         grid_total = np.zeros((grid_info['rows'], grid_info['cols']), dtype=np.float32)
472
473         for r in SEL_REGIONS:
474             if r not in proxies_urb or r not in proxies_int: continue
475             plot_data_year[pol][r] = {}
476             grid_reg = np.zeros_like(grid_total)
477             row_excel = {'Ano': anno, 'Region': r}
478             total_reg_row = 0.0
479
480             for cat in sel_cats:
481                 val_u = get_emission_value(emissions_db[pol], anno, cat, "Urbano", f"R{r}")
482                 val_i = get_emission_value(emissions_db[pol], anno, cat, "Interurbano", f"R{r}")
483
484             gg_val = (val_u + val_i) * 1e-9
485             row_excel[cat] = gg_val
486             total_reg_row += gg_val
487
488             g_u = proxies_urb[r].get(cat, 0) * val_u * 1e-9
489             g_i = proxies_int[r] * val_i * 1e-9
490
491             plot_data_year[pol][r][f"{cat}_Urb"] = np.sum(g_u)
492             plot_data_year[pol][r][f"{cat}_Int"] = np.sum(g_i)
493

```

```

494     grid_reg += (g_u + g_i)
495
496     row_excel['Total'] = total_reg_row
497     global_excel_report[pol].append(row_excel)
498     grid_total += grid_reg
499
500     # Guardar Totales
501     if np.sum(grid_total) > 0:
502         print(f"-----{pol}: {np.sum(grid_total):.4f} Gg")
503         # Guardar en subcarpetas correspondientes
504         with rasterio.open(os.path.join(dir_tif, f"{pol_clean}-TOTAL-CHILE.tif"), 'w',
505                             **meta) as dst:
506             dst.write(grid_total, 1)
507             da = xr.DataArray(grid_total, coords={'lat': lats, 'lon': lons}, dims=('lat',
508                                     'lon'), name=pol_clean, attrs={'units': 'Gg'})
509             da.to_netcdf(os.path.join(dir_nc, f"{pol_clean}-TOTAL-CHILE.nc"))
510
511         global_temporal_stats[pol][anno] = np.sum(grid_total)
512
513         # --- GENERACION DE GRAFICOS (Ahora en /Graficos) ---
514         create_year_detail_chart(plot_data_year[pol], pol, anno, os.path.join(dir_img,
515                                     f"1_Detalle_{pol_clean}.png"))
516         create_stacked_regional_chart(plot_data_year[pol], pol, anno, os.path.join(
517             dir_img, f"2_Composicion_{pol_clean}.png"))
518         create_heatmap_contribution(plot_data_year[pol], pol, anno, os.path.join(
519             dir_img, f"3_Heatmap_{pol_clean}.png"))
520
521         # --- 3. Finalizacion y Reportes Globales ---
522         print("\n---3. Generando Reportes Globales---")
523
524         excel_path = os.path.join(run_name_base, "REPORTE_CONSOLIDADO.xlsx")
525         try:
526             with pd.ExcelWriter(excel_path) as writer:
527                 for pol, data in global_excel_report.items():
528                     if data: pd.DataFrame(data).to_excel(writer, sheet_name=pol[:31], index=False)
529                     print(f"Excel guardado: {excel_path}")
530         except: print("Error guardando Excel.")
531
532         # Tendencias (si aplica)
533         if len(years_list) > 1:
534             trend_dir = os.path.join(run_name_base, "Tendencias Globales")
535             create_temporal_plots(global_temporal_stats, trend_dir)
536
537         print("\nPROCESO FINALIZADO.")

```

### A.3. Código de Procesamiento de Emisiones Aéreas

A diferencia de los modos superficiales (terrestre y marítimo), la desagregación espacial de las emisiones de aviación requiere un tratamiento topológico que contemple



la altitud de las operaciones. El siguiente motor geoespacial fue programado en Python para distribuir las cargas contaminantes sobre la grilla tridimensional de alta resolución para el año que se desee analizar teniendo en consideración todo lo relativo a la dinámica de las emisiones generadas por el modo de transporte aéreo.

Este motor de cálculo elaborado también culmina con una fase estricta de validación y control de calidad, ya que si tras la suma matricial se detecta una pérdida de masa, el modelo recalcula y reasigna los remanentes distribuyendo el diferencial proporcionalmente sobre las celdas activas reales correspondientes a cada fase de manera independiente. De este modo, se garantiza el balance estricto con los totales nacionales y se evitan las distorsiones que generaría la aplicación de un factor corrector global ciego.

#### Desagregacion\_Espacial\_Aerea\_3D.py

```

1      import os
2      import sys
3      import logging
4      import numpy as np
5      import pandas as pd
6      import geopandas as gpd
7      import xarray as xr
8      import rasterio
9      from affine import Affine
10     from shapely.geometry import box
11
12     import matplotlib
13     matplotlib.use('Agg')
14     import matplotlib.pyplot as plt
15     import matplotlib.colors as mcolors
16     import seaborn as sns
17     from matplotlib.patches import Circle
18     import urllib.request
19
20
21     logging.basicConfig(level=logging.INFO, format='%(asctime)s_-%(levelname)s_-%
22         %(message)s')
23     plt.style.use('seaborn-v0_8-darkgrid')
24
25     YEAR_ANALYSIS = 2023
26     UNIT_LABEL = "Gg"
27
28     POLLUTANTS_BASE = [
29         'CO2', 'NOX', 'SOX', 'CO', 'HC', 'PM_TOTAL',
30         'PM_NON_VOLATILE', 'PM_VOLATILE_(ORGANIC+SULPHUROUS)'
31     ]
32
33     EPSILON_AUDIT = 1e-4

```

```

34     VISUAL_FLOOR = 1e-15
35
36     EPSG_WGS84 = 4326
37     EPSG_UTM = 32719
38     CRUISE_ALTITUDE = 11000
39     Z_LAYERS = np.arange(1000, 11000, 1000)
40
41     BASE_DIR = r"C:\Users\david\Desktop\David_Bevilacqua_Files\python1"
42     INPUT_DIR = os.path.join(BASE_DIR, f"Modular_Emissions_System_{YEAR_ANALYSIS}"
43                               )
44
45     # Archivos Input
46     FILE_GRID = os.path.join(BASE_DIR, "Inputs", "inema-2.0_CO2_1A4b_0.01x0.01
47                               _2015.nc")
48     FILE_GPKG = os.path.join(INPUT_DIR, "01_Processed_Data_QAQC_Estricto", f"
49                               Master_Flight_Network_{YEAR_ANALYSIS}.gpkg")
50     FILE_EXCEL_CCD = os.path.join(INPUT_DIR, "00_Reportes_Analiticos_QAQC_Estricto
51                                     ", "Reporte_Distribucion_CCD.xlsx")
52     FILE_EXCEL_LTO = os.path.join(INPUT_DIR, "00_Reportes_Analiticos_QAQC_Estricto
53                                     ", "Reporte_Distribucion_LTO.xlsx")
54     FILE_SHP_AIRPORTS = os.path.join(BASE_DIR, "Inputs", "Aeropuertos", "
55                                         Aeropuertos.shp")
56     FILE_TEMPORAL = os.path.join(BASE_DIR, "Base_de_datos", "
57                                     PerfilesTemporalesPorAeronave2020_2025",
58                                     "Perfiles_2023_PorAeronave_Type", "Perfiles_2023_PorAeronave_Nac",
59                                     f"000_TODAS_LAS_AERONAVES_{YEAR_ANALYSIS}_Nac.xlsx")
60
61     # Carpetas Output
62     OUTPUT_DIR = os.path.join(INPUT_DIR, "02
63                               _Spatial_Outputs_Final_QAQC_2023_Estricto")
64     SUBDIRS = {
65         'tif': os.path.join(OUTPUT_DIR, "01_GeoTIFF_2D"),
66         'nc': os.path.join(OUTPUT_DIR, "02_NetCDF_3D"),
67         'maps': os.path.join(OUTPUT_DIR, "03_Cartografia_Hotspots_PNG"),
68         'audit': os.path.join(OUTPUT_DIR, "04_Reportes_Auditoria_Excel"),
69         'stats': os.path.join(OUTPUT_DIR, "05_Graficas_Estadisticas_Tesis")
70     }
71     for folder in SUBDIRS.values(): os.makedirs(folder, exist_ok=True)
72
73     URL_CHILE_GEOJSON = "https://raw.githubusercontent.com/johan/world.geo.json/
74                         master/countries/CHL.geo.json"
75
76     def get_altitude_index(percent_dist: float) -> int:
77         if percent_dist <= 0.10: return int((np.abs(Z_LAYERS - (1000 + (percent_dist
78             /0.10)*10000))).argmin())
79         elif percent_dist >= 0.90: return int((np.abs(Z_LAYERS - (11000 - ((
80             percent_dist-0.90)/0.10)*10000))).argmin())
81         return int((np.abs(Z_LAYERS - CRUISE_ALTITUDE))).argmin())
82
83     def get_cell_indices(lon: float, lat: float, lons: np.ndarray, lats: np.

```

```

75         ndarray) -> tuple:
76     return np.argmin(np.abs(lons - lon)), np.argmin(np.abs(lats - lat))
77
78     def plot_temporal_profiles_to_png():
79         logging.info("1.->_Generando_Figuras_de_Perfiles_Temporales...")
80         sheets = {
81             'Monthly_Distribution': ('PERFIL_MES', 'mes', 'Month'),
82             'Hourly_Distribution': ('PERFIL_HORA', 'hora', 'Hour_of_Day'),
83             'Seasonal_Distribution': ('PERFIL_ESTACION', 'estacion', 'Season'),
84             'Weekly_Distribution': ('PERFIL_DIA_SEM', 'dia_semana', 'Day_of_Week')
85         }
86
87         for title, (sheet_name, col_name, xlabel) in sheets.items():
88             try:
89                 df = pd.read_excel(FILE_TEMPORAL, sheet_name=sheet_name).dropna(subset=[
90                     col_name, 'porcentaje_vuelos'])
91                 df['Percentage_%'] = df['porcentaje_vuelos'] * 100
92
93                 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
94                 if sheet_name in ['PERFIL_MES', 'PERFIL_HORA']:
95                     sns.lineplot(data=df, x=col_name, y='Percentage_%', marker="o", linewidth
96                         =2.5, color="#e74c3c", ax=ax)
97                     ax.fill_between(df[col_name], df['Percentage_%'], alpha=0.2, color="#e74c3c"
98                         )
99                     if sheet_name == 'PERFIL_MES': ax.set_xticks(range(1, 13))
100                 else:
101                     sns.barplot(data=df, x=col_name, y='Percentage_%', hue=col_name, palette="
102                         viridis", legend=False, ax=ax)
103
104                 plt.title(f'{title}_of_Domestic_Flights_{(YEAR_ANALYSIS)}', weight='bold',
105                     fontsize=14)
106                 plt.ylabel('Share_of_Total_Operations_%', fontsize=12)
107                 plt.xlabel(xlabel, fontsize=12)
108                 plt.tight_layout()
109                 plt.savefig(os.path.join(SUBDIRS['stats'], f"Profile_{sheet_name}_{
110                     YEAR_ANALYSIS}.png"), dpi=300)
111                 plt.close()
112             except Exception as e:
113                 logging.warning(f"Omitiendo_{sheet_name}:{e}")
114
115     def run_spatial_engine():
116         logging.info("1.-Ingstando_fuentes_espaciales_y_tabulares...")
117         ds = xr.open_dataset(FILE_GRID)
118         lats, lons = ds['lat'].values, ds['lon'].values
119         res_lat, res_lon = abs(lats[1] - lats[0]), abs(lons[1] - lons[0])
120         west_edge, north_edge = np.min(lons) - (res_lon / 2.0), np.max(lats) + (
121             res_lat / 2.0)
122         is_lat_asc = lats[0] < lats[-1]
123         geo_info = (west_edge, north_edge, res_lon, res_lat)
124
125         df_ccd = pd.read_excel(FILE_EXCEL_CCD)

```

```

119 df_lto_raw = pd.read_excel(FILE_EXCEL_LTO)
120 active_pols = [p for p in POLLUTANTS_BASE if f'Gg_{p}_CCD' in df_ccd.columns]
121
122 gdf_airports = gpd.read_file(FILE_SHP_AIRPORTS).to_crs(epsg=EPSG_WGS84)
123 gdf_airports['cod_oaci'] = gdf_airports['cod_oaci'].astype(str).str.strip().
    str.upper()
124 df_lto_raw['Codigo_ICAO'] = df_lto_raw['Codigo_ICAO'].astype(str).str.strip().
    str.upper()
125
126 gdf_lto = df_lto_raw.merge(gdf_airports[['cod_oaci', 'geometry']], left_on='
    Codigo_ICAO', right_on='cod_oaci', how='left')
127 gdf_lto = gpd.GeoDataFrame(gdf_lto, geometry='geometry', crs=EPSG_WGS84)
128 gdf_lto['Lat_Nativa'] = gdf_lto.apply(lambda r: r['geometry'].centroid.y if pd
    .notnull(r['geometry']) else r['Latitud'], axis=1)
129 gdf_lto['Lon_Nativa'] = gdf_lto.apply(lambda r: r['geometry'].centroid.x if pd
    .notnull(r['geometry']) else r['Longitud'], axis=1)
130
131 gdf_routes = gpd.read_file(FILE_GPKG, layer="flight_routes").dissolve(by='
    ROUTE_KEY').reset_index()
132
133 matrices = {pol: {'CCD': np.zeros((len(Z_LAYERS), len(lats), len(lons)), dtype
    =np.float64),
134                 'LTO': np.zeros((len(Z_LAYERS), len(lats), len(lons)), dtype=
    np.float64)} for pol in active_pols}
135
136 airport_cells = set()
137
138 logging.info("2. Rasterizando Fase LTO (Aeropuertos Exactos)...")
139 for _, row in gdf_lto.iterrows():
140     ix, iy = get_cell_indices(row['Lon_Nativa'], row['Lat_Nativa'], lons, lats)
141     airport_cells.add((ix, iy)) # Memorizamos la celda del aeropuerto
142
143 for pol in active_pols:
144     mass_lto = np.float64(row.get(f'Gg_{pol}_LTO', 0.0))
145     if pd.isna(mass_lto): mass_lto = 0.0
146     matrices[pol]['LTO'][0, iy, ix] += max(mass_lto, VISUAL_FLOOR)
147
148 logging.info(f"-> {len(airport_cells)} celdas de aeropuerto blindadas contra
    traslape de fase CCD.")
149
150 logging.info("3. Rasterizando Fase CCD (Excluyendo celdas LTO)...")
151 gdf_ccd = gdf_routes[['ROUTE_KEY', 'geometry']].merge(df_ccd, on='ROUTE_KEY',
    how='left')
152 step_size = min(res_lon, res_lat) / 2.0
153
154 for _, row in gdf_ccd.iterrows():
155     line_wgs = row.geometry
156     if line_wgs is None or line_wgs.is_empty: continue
157
158     line_utm = gpd.GeoSeries([line_wgs], crs=EPSG_WGS84).to_crs(EPSG_UTM).iloc[0]
159
160     num_points = int(np.ceil(line_wgs.length / step_size)) + 1

```

```

161 unique_cells = set()
162 for frac in np.linspace(0, 1, num_points):
163     pt = line_wgs.interpolate(frac, normalized=True)
164     ix = np.argmin(np.abs(lons - pt.x))
165     iy = np.argmin(np.abs(lats - pt.y))
166     unique_cells.add((ix, iy))
167
168     intersected = []
169     for (i, j) in unique_cells:
170         # FIX: Si la celda es un aeropuerto (ej. SCEL), la omitimos en CCD
171         if (i, j) in airport_cells:
172             continue
173
174         cell_box = box(lons[i] - res_lon/2, lats[j] - res_lat/2, lons[i] + res_lon/2,
175                        lats[j] + res_lat/2)
176         if line_wgs.intersects(cell_box):
177             inter_wgs = line_wgs.intersection(cell_box)
178             inter_utm = gpd.GeoSeries([inter_wgs], crs=EPSG_WGS84).to_crs(EPSG_UTM).iloc
179                 [0]
180             if inter_utm.length > 0:
181                 intersected.append({'x': i, 'y': j, 'L': inter_utm.length, 'geom': inter_utm})
182
183         if not intersected: continue
184         L_total = sum([s['L'] for s in intersected])
185
186         for seg in intersected:
187             weight = seg['L'] / L_total
188             dist_pct = line_utm.project(seg['geom'].interpolate(0.5, normalized=True)) /
189                 line_utm.length
190             z_idx = get_altitude_index(dist_pct)
191
192             for pol in active_pols:
193                 mass_ccd = np.float64(row.get(f'Gg_{pol}_CCD', 0.0))
194                 if pd.isna(mass_ccd): mass_ccd = 0.0
195                 matrices[pol]['CCD'][z_idx, seg['y'], seg['x']] += max(mass_ccd * weight,
196                               VISUAL_FLOOR)
197
198     return matrices, lats, lons, geo_info, is_lat_asc, df_ccd, gdf_lto, gdf_routes
199
200 def plot_cartography(matrix_2d: np.ndarray, pol: str, phase_name: str,
201                     gdf_base: gpd.GeoDataFrame, gdf_lto: pd.DataFrame, geo_info: tuple,
202                     is_lat_asc: bool):
203     """Renderiza mapas independientes para CCD, LTO y TOTAL con visuales
204     optimizadas."""
205     logging.info(f"-> Renderizando Mapa PNG: {pol} ({phase_name})...")
206     west, north, r_lon, r_lat = geo_info
207     h, w = matrix_2d.shape
208     plot_matrix = np.flipud(matrix_2d) if is_lat_asc else matrix_2d
209     extent = [west, west + (w * r_lon), north - (h * r_lat), north]
210
211     masked_data = np.ma.masked_where(plot_matrix < VISUAL_FLOOR, plot_matrix)

```

```

206
207 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 14), facecolor='#0D1117')
208 ax.set_facecolor('#0D1117')
209
210 try:
211     chile = gpd.read_file(URL_CHILE_GEOJSON)
212     chile.plot(ax=ax, color='#1e272e', edgecolor='#4b6584', linewidth=0.8, zorder
                =1)
213 except Exception as e:
214     pass # Falla silenciosa si no hay internet
215
216 gdf_base.to_crs(epsg=EPSG_WGS84).plot(ax=ax, color='#34495e', linewidth=0.3,
                alpha=0.5, zorder=2)
217
218 vmax_val = max(masked_data.max(), VISUAL_FLOOR * 10)
219 colormap = 'plasma' if phase_name == 'CCD' else 'inferno' # Plasma resalta
                mejor las rutas
220
221 im = ax.imshow(masked_data, cmap=colormap, norm=mcolors.LogNorm(vmin=
                VISUAL_FLOOR, vmax=vmax_val),
222 extent=extent, origin='upper', alpha=0.9, zorder=3)
223
224 cbar = plt.colorbar(im, ax=ax, shrink=0.7, pad=0.04)
225 cbar.set_label(f'{pol}_Emissions_{UNIT_LABEL}/cell\nLogarithmic Intensity',
                color='white', fontsize=12, weight='bold')
226 cbar.ax.yaxis.set_tick_params(color='white', labelcolor='white')
227
228 # 4. Buffers Proporcionales (Solo para LTO y TOTAL)
229 if phase_name in ['LTO', 'TOTAL']:
230     top_airports = gdf_lto.sort_values(by=f'Gg_{pol}_LTO', ascending=False)
231     max_emis = top_airports[f'Gg_{pol}_LTO'].max()
232
233     for idx, row in top_airports.head(15).iterrows():
234         lat, lon = row['Lat_Nativa'], row['Lon_Nativa']
235         mass = row[f'Gg_{pol}_LTO']
236         icao = row['Codigo_ICAO']
237         if mass <= VISUAL_FLOOR: continue
238
239         marker_size = (mass / max_emis) * 1200 + 40
240         ax.scatter(lon, lat, s=marker_size, color='none', edgecolor='#00ff00',
                linewidth=2, zorder=4)
241
242     # Textos solo para los Top 5
243     if idx in top_airports.head(5).index:
244         ax.annotate(f'{icao}\n{mass:.1f}_{UNIT_LABEL}', xy=(lon, lat), xytext=(40, 20)
                , textcoords='offsetpoints',
245         arrowprops=dict(facecolor='white', arrowstyle="->", connectionstyle="arc3,rad
                =0.3"),
246         color='black', fontsize=9, weight='bold', bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.2",
                fc="white", alpha=0.9), zorder=5)
247
248 minx, miny, maxx, maxy = gdf_base.total_bounds

```

```

249 ax.set_xlim([minx - 2, maxx + 3])
250 ax.set_ylim([miny - 1, maxy + 1])
251 ax.tick_params(colors='white')
252
253 plt.title(f'Aviation_Hotspots_{pol}_{phase_name}Phase)\nSpatial_Grid_
      Analysis_{YEAR_ANALYSIS}', color='white', fontsize=15, weight='bold',
      pad=20)
254 plt.tight_layout()
255 plt.savefig(os.path.join(SUBDIRS['maps'], f"Map_{pol}_{phase_name}_{
      YEAR_ANALYSIS}.png"), dpi=300, facecolor='#0D1117')
256 plt.close()
257
258 def plot_extended_thesis_statistics(df_ccd: pd.DataFrame, gdf_lto: pd.
      DataFrame, active_pols: list):
259     for pol in active_pols:
260         # A) TOP 15 RANKINGS (Barras Horizontales)
261         fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(18, 8))
262
263         top_ccd = df_ccd.nlargest(15, f'Gg_{pol}_CCD')
264         sns.barplot(data=top_ccd, y='Ruta_Unificada', x=f'Gg_{pol}_CCD', hue='
            Ruta_Unificada', ax=axes[0], palette='rocket', legend=False)
265         axes[0].set_title(f'Top_15_Air_Routes_by_{pol}_Emissions_(Cruise_Phase)',
            weight='bold', fontsize=14)
266         axes[0].set_xlabel(f'Total_Emissions_{UNIT_LABEL}', fontsize=12)
267         axes[0].set_ylabel('')
268
269         top_lto = gdf_lto.nlargest(15, f'Gg_{pol}_LTO')
270         sns.barplot(data=top_lto, y='Ciudad_Aeropuerto', x=f'Gg_{pol}_LTO', hue='
            Ciudad_Aeropuerto', ax=axes[1], palette='viridis', legend=False)
271         axes[1].set_title(f'Top_15_Airports_by_{pol}_Emissions_(LTO_Phase)', weight='
            bold', fontsize=14)
272         axes[1].set_xlabel(f'Total_Emissions_{UNIT_LABEL}', fontsize=12)
273         axes[1].set_ylabel('')
274
275         plt.tight_layout()
276         plt.savefig(os.path.join(SUBDIRS['stats'], f"Bar_Rankings_{pol}_{YEAR_ANALYSIS}
            }.png"), dpi=300)
277         plt.close()
278
279         # B) DONUT CHART: CCD vs LTO Share
280         fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
281         ccd_sum = df_ccd[f'Gg_{pol}_CCD'].sum()
282         lto_sum = gdf_lto[f'Gg_{pol}_LTO'].sum()
283
284         if ccd_sum + lto_sum > 0:
285             wedges, texts, autotexts = ax.pie([ccd_sum, lto_sum], labels=['Cruise_(CCD)',
                'Landing/Take-Off_(LTO)'],
                autopct='%1.1f%%', startangle=90, colors=['#3498db', '#e74c3c'],
                wedgeprops=dict(width=0.4, edgecolor='w'))
286             plt.setp(autotexts, size=12, weight="bold", color="white")
287             ax.set_title(f'Emission_Phase_Share_{pol}_{YEAR_ANALYSIS}', weight='bold',
                fontsize=15)

```

```

290 plt.tight_layout()
291 plt.savefig(os.path.join(SUBDIRS['stats'], f"Donut_PhaseShare_{pol}_{
    YEAR_ANALYSIS}.png"), dpi=300)
292 plt.close()
293
294
295 def export_and_audit(matrices: dict, lats: np.ndarray, lons: np.ndarray,
    geo_info: tuple, is_lat_asc: bool, df_ccd: pd.DataFrame, gdf_lto: pd.
    DataFrame, gdf_routes: gpd.GeoDataFrame):
296 west, north, res_lon, res_lat = geo_info
297 transform = Affine.translation(west, north) * Affine.scale(res_lon, -res_lat)
298 audit_data = []
299
300 for pol, phases in matrices.items():
301 logging.info(f"[{pol}]_QA/QC, Exportando y Graficando las 3 Fases...")
302 mat_total = phases['CCD'] + phases['LTO']
303
304 target_ccd = df_ccd[f'Gg_{pol}_CCD'].sum()
305 target_lto = gdf_lto[f'Gg_{pol}_LTO'].sum()
306 target_total = target_ccd + target_lto
307
308 mass_grid = np.sum(mat_total)
309 delta = target_total - mass_grid
310
311 if abs(delta) > EPSILON_AUDIT:
312 valid_mask_ccd = phases['CCD'] > 0
313 total_valid_ccd = np.sum(phases['CCD'][valid_mask_ccd])
314 # Toda la correccion de CCD recae en la red aerea real, fuera del aeropuerto
315 if total_valid_ccd > 0:
316 phases['CCD'] += (phases['CCD'] / total_valid_ccd) * (target_ccd - np.sum(
    phases['CCD']))
317
318 valid_mask_lto = phases['LTO'] > 0
319 total_valid_lto = np.sum(phases['LTO'][valid_mask_lto])
320 if total_valid_lto > 0:
321 phases['LTO'] += (phases['LTO'] / total_valid_lto) * (target_lto - np.sum(
    phases['LTO']))
322
323 mat_total_final = phases['CCD'] + phases['LTO']
324 mass_grid_final = np.sum(mat_total_final)
325 final_delta = abs(target_total - mass_grid_final)
326
327 # Generacion de Exportaciones INDEPENDIENTES (3 mapas por contaminante)
328 for name, matrix in [('CCD', phases['CCD']), ('LTO', phases['LTO']), ('TOTAL',
    mat_total_final)]:
329 m_f32 = matrix.astype(np.float32)
330 da = xr.DataArray(m_f32, coords={'altitude': Z_LAYERS, 'lat': lats, 'lon':
    lons}, dims=('altitude', 'lat', 'lon'), name=f"{pol}_{name}")
331 da.to_netcdf(os.path.join(SUBDIRS['nc'], f"{pol}_{name}_{YEAR_ANALYSIS}.nc"))
332
333 m_2d = np.flipud(np.sum(m_f32, axis=0)) if is_lat_asc else np.sum(m_f32, axis
    =0)

```



```

334     with rasterio.open(os.path.join(SUBDIRS['tif'], f"{pol}_{name}_{YEAR_ANALYSIS
335         }.tif"), 'w', driver='GTiff',
336         height=m_2d.shape[0], width=m_2d.shape[1], count=1, dtype=str(m_2d.dtype),
337         crs=EPSG_WGS84, transform=transform, compress='lzw', nodata=0.0) as dst:
338         dst.write(m_2d, 1)
339
340     # Llamado a cartografia para CADA fase
341     plot_cartography(np.sum(m_f32, axis=0), pol, name, gdf_routes, gdf_lto,
342         geo_info, is_lat_asc)
343
344     audit_data.append({
345         'Pollutant': pol,
346         'Excel_Target_Mass_Gg': target_total,
347         'Grid_Assigned_Mass_Gg': mass_grid_final,
348         'Absolute_Diff_Gg': final_delta,
349         'QA/QC_Status': "APPROVED" if final_delta < EPSILON_AUDIT else "
350             WARNING"
351     })
352
353     pd.DataFrame(audit_data).to_excel(os.path.join(SUBDIRS['audit'], f"
354         Voxel_Mass_Balance_Audit_{YEAR_ANALYSIS}.xlsx"), index=False)
355     plot_extended_thesis_statistics(df_ccd, gdf_lto, list(matrices.keys()))
356
357     if __name__ == "__main__":
358     print(f"\n{'='*70}\n[SCRIPT_2]_MOTOR_ESPACIAL_ESTATICO_MULTI-FASE_{(
359         YEAR_ANALYSIS)}\n{'='*70}")
360
361     plot_temporal_profiles_to_png()
362     mats, lats, lons, geo_info, is_lat_asc, df_ccd, gdf_lto, gdf =
363         run_spatial_engine()
364     export_and_audit(mats, lats, lons, geo_info, is_lat_asc, df_ccd, gdf_lto, gdf)
365
366     print(f"\n[OK]_Script_2_Finalizado._Revisa_los_mapas_independientes_de_LT0,_
367         CCD_y_TOTAL.")

```