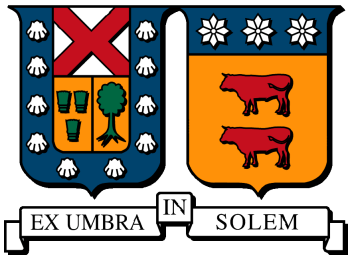
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



TENDENCIAS ANUALES DE EMISIONES CONTAMINANTES LOCALES Y GLOBALES GENERADAS POR EL SECTOR TRANSPORTE EN PAÍSES DE AMÉRICA DEL SUR

GABRIELA PATRICIA CAMPOS URRA

PROFESOR GUÍA : DR. MAURICIO OSSES ALVARADO
PROFESOR CORREFERENTE : DR. SHEILA LASCANO

Noviembre 2025

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: Tendencias anuales de emisiones contaminantes locales y globales generadas por el sector transporte en países de América del Sur.

Nombre del candidato(a): Gabriela Patricia Campos Urra

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: San Joaquín **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Osses Alvarado, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

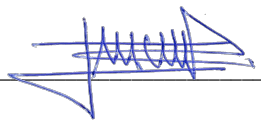
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

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

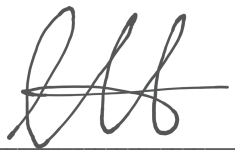
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 18/12/2025 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18/12/2025 **Firma:** 

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

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) 124177 y al proyecto FONDAP CR2 1523A0002 por el apoyo brindado a esta investigación. Su su respaldo ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco a la plataforma ECCAD, gestionada por AERIS, por proveer datos clave sobre emisiones atmosféricas.

A todas las personas, instituciones y fuentes que contribuyeron directa o indirectamente a este proceso, les extiendo mi gratitud y reconocimiento.

Gabriela Campos
Noviembre 2025

Índice general

1. Estado del arte 2
   1.1. Bases de datos internacionales 2
      1.1.1. Emisiones de compuestos atmosféricos y recopilación de datos auxiliares (ECCAD) 2
      1.1.2. Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica mundial (EDGAR) 3
      1.1.3. Sistema comunitario de datos de emisiones (CEDS) 7
      1.1.4. Servicio de vigilancia de la atmósfera de copernicus (CAMS) . 8
      1.1.5. Agencia internacional de la energía (IEA) 10
      1.1.6. Conclusiones 11
   1.2. Bases de datos locales disponibles 12
      1.2.1. Argentina 12
      1.2.2. Brasil 13
      1.2.3. Chile 14
      1.2.4. Colombia 15
      1.2.5. Conclusiones 16

2. Metodología 18
   2.1. ECCAD 18
   2.2. IEA 22
   2.3. Inventarios nacionales 23
      2.3.1. Argentina 23
      2.3.2. Brasil 24
      2.3.3. Chile 24
      2.3.4. Colombia 25

3. Análisis de tendencias anuales de emisiones para el sector transporte 26
3.1. Emisiones de compuestos atmosféricos y recopilación de datos auxiliares (ECCAD) . . . 27
3.1.1. Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica mundial (EDGAR) . . . 27
3.1.2. Sistema comunitario de datos de emisiones (CEDS) . . . 33
3.1.3. Servicio de vigilancia de la atmósfera de copernicus (CAMS) . 34
3.1.4. Conclusiones . . . 36
3.2. Comparación Inventarios pertenecientes a ECCAD . . . 37
3.2.1. Conclusiones . . . 39
3.3. Agencia internacional de energía (IEA) . . . 39
3.3.1. Conclusiones . . . 40

4. Análisis de tendencias anuales de emisiones reportadas por países de América del Sur 41
4.1. Argentina . . . 41
4.1.1. Conclusiones . . . 42
4.2. Brasil . . . 43
4.2.1. Conclusiones . . . 44
4.3. Chile . . . 45
4.3.1. Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile (INGEI) . . . 45
4.3.2. Inventario nacional de emisiones antropogénicas de Chile (INEMA) . . . 46
4.3.3. Conclusiones . . . 47
4.4. Colombia . . . 48
4.4.1. Conclusiones . . . 49

5. Análisis comparativo de emisiones reportadas por inventarios internacionales y locales en países de América del sur 50
5.1. Argentina . . . 51
5.1.1. Conclusiones . . . 56
5.2. Brasil . . . 57
5.2.1. Conclusiones . . . 62
5.3. Chile . . . 63

5.3.1. Conclusiones 68
5.4. Colombia 69
5.4.1. Conclusiones 74

6. Conclusiones y recomendaciones 76
6.1. Conclusiones generales 76
6.2. Conclusiones especificas 78
6.2.1. Conclusiones revisión inventarios de datos nacionales e internacionales 78
6.2.2. Conclusiones de tendencias de emisiones anuales para el sector trasporte reportadas por ECCAD e IEA 80
6.2.3. Conclusiones de tendencias de emisiones anuales reportadas por inventarios locales de países de América del Sur 82
6.2.4. Conclusiones análisis comparativo de emisiones en países de América del Sur 83
6.3. Recomendaciones 88

Índice de figuras

1.1. Emisiones de CO2,BC, PM10,PM2.5 y NOx en el sector transporte por carrtera en América del Sur, año 1970 a 2012, EDGARv4.3.2. [5]. . . . 4
1.2. Emisiones de CO2, NOx, BC, PM10 y PM2.5, año 1970 a 2018, EDGARV5 [4]. . . . 5
1.3. Emisiones de NOx, BC, PM10 y PM2.5, año 1970 a 2018, EDGARV6 [7]. 6
1.4. Emisiones de CO2, año 1970 a 2021, EDGARV7 [6]. . . . 7
1.5. Emisiones de CO2, BC, NOx en el sector transporte por carretera en América del Sur, año 1950 a 2019, CEDS [34] [27]. . . . 8
1.6. Emisiones de CO2, BC y NOx en el sector transporte por carretera en América del Sur, año 2000 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [14] [36]. . . . 9

2.1. Datos de registro para el portal ECCAD. . . . 19
2.2. Vista general acceso a ECCAD . . . 19
2.3. Panel de filtrado para elegir inventario de datos, especies, sectores, cobertura temporal y geográfica. . . . 20
2.4. Interfaz de selección de parámetros de análisis temporal de cada inventario. . . . 20
2.5. Interfaz de selección de países y sectores para descarga de datos plataforma ECCAD. . . . 21
2.6. Grafica online entregada por ECCAD y ubicación de descarga de datos. 21
2.7. Acceso portal IEA. . . . 22
2.8. Interfaz de selección de países portal IEA. . . . 22
2.9. Grafica entregada por IEA para descarga de datos. . . . 23
2.10. Acceso a datos portal SInIA . . . 23
2.11. Descarga de datos portal SInIA . . . 24
2.12. Visualización de emisiones en plataforma SEEG . . . 24

2.13. Visualización portal INGEI para descarga de datos. 25

3.1. Emisiones de CO2, NOx, BC, PM10 yPM2.5 en el sector transporte por carretera en Chile y Argentina, año 1970 a 2012, EDGARv4.3.2. [5]. . 28
3.2. Emisiones de CO2 y NOx para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2015, EDGARv5 [4]. 29
3.3. Emisiones de PM10 y PM2.5 para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2015, EDGARv5 [4]. 29
3.4. Emisiones de BC para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2015, EDGARv5 [4]. 30
3.5. Emisiones de BC y NOx para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2018, EDGARv6 [7]. 31
3.6. Emisiones de PM10 y PM2.5 para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2018, EDGARv6 [7]. 31
3.7. Emisiones de CO2 en el sector transporte por carretera en Chile,Colombia,Argentina y Brasil, año 1970 a 2021, EDGARv7 [6]. 32
3.8. Emisiones de CO2, NOx yBC para el sector transporte por carretera, año 1950 a 2019, CEDS. [34] [27]. 33
3.9. Emisiones de CO2 para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [36] [14]. 34
3.10. Emisiones de BC para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [36] [14]. 35
3.11. Emisiones de NOx para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [36] [14]. 35
3.12. Comparación emisiones en sector transporte en América del Sur, EDGARD (V4.3.2, V5, V6, V7), CEDS, CAMS V6.2. 38
3.13. Emisiones de CO2 para el sector transporte, año 1990 a 2022, IEA [20]. 39

4.1. Emisiones de CO2 en Argentina según inventario nacional SInIA (1990–2020) [24]. 42
4.2. Análisis comparativo de las tendencias de CO2 y NOx según datos del SEEG (1990-2023) [11]. 43
4.3. Tendencias relativas de emisiones de GEI en Brasil (1990–2023) [11]. . 44
4.4. Emisiones de CO2 en Chile según INGEI (1990–2022) [26]. 45

4.5. Comparación temporal de CO2, PM2.5, BC y NOx según INEMA 2 (1990-2023). 46
4.6. Comparación estandarizada de CO2, PM2.5, BC y NOx datos INEMA (1990-2023) 47
4.7. Comparación emisiones de CO2, PM2.5, BC y NOx datos PAPILA (1990-2020) [31] 48
4.8. Comparación estandarizada de CO2, PM2.5, BC y NOx datos PAPILA (1990-2020) [31]. 49

5.1. Evolución de emisiones de CO2 en Argentina 1970–2024 y detalle desde 1990, EDGARD (V4.3.2, V5, V7), CEDS, CAMS (V5.3 ,V6.2), IEA y SInIA. 51
5.2. Evolución de emisiones de CO2 organico en Argentina 1970–2024, EDGARD (V5, V7), CEDS, CAMS (V5.3 ,V6.2) 52
5.3. Evolución de emisiones de NOx en Argentina 1970–2024 y detalle desde 1990, EDGARD (V4.3.2, V5, V6, V7), CEDS y CAMS (V5.3 ,V6.2). 53
5.4. Evolución de emisiones de BC en Argentina 1970–2024, EDGARD (V4.3.2, V5, V6), CEDS, CAMS (V5.3 ,V6.2). 54
5.5. Evolución de emisiones de BC-resuspensión en Argentina 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 54
5.6. Evolución de emisiones de PM10-PM2.5 en Argentina 1970–2018, EDGARD (V4.3.2, V5, V6). 55
5.7. Evolución de emisiones de PM10-PM2.5-resuspensión en Argentina 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 55
5.8. Evolución de emisiones de CO2 en Brasil, EDGAR (V5,V7), CEDS, CAMS (V5.3, V6.2), IEA, SEEG. 57
5.9. Emisiones de CO2 del ciclo orgánico en Brasil según inventarios internacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V6), CAMS (V5.3,V6.2). 58
5.10. Evolución de emisiones de NOx en Brasil (1970-2024), EDGAR (V5,V6), CEDS, CAMS (V5.2, V6.2) y SEEG. 59
5.11. Evolución de emisiones de BC en Brasil 1970–2024, EDGARD (V4.3.2, V5, V6), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2). 60
5.12. Evolución de emisiones de BC-resuspensión en Brasil 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 60

5.13. Evolución de emisiones de material particulado en Brasil 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 61
5.14. Evolución de emisiones de material particulado con resuspensión en Brasil 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 61
5.15. Emisiones de CO2 en Chile según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V4.3.2,V5,V7), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), IEA, INGEI, INEMA. 63
5.16. Emisiones de CO2–ciclo-orgánico en Chile según inventarios internacionales (2005–2024), EDGAR (V5,V7), CAMS (V5.3, V6.2). 64
5.17. Emisiones de NOx en Chile según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V4.3.2,V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), INEMA 65
5.18. Emisiones de BC en Chile según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V4.3.2,V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3, V6.2), INEMA. 66
5.19. Emisiones de BC con resuspensión en Chile según inventarios internacionales (1970–2018), EDGAR (V5,V6). 66
5.20. Evolución de emisiones de material particulado en Chile 1970–2023, EDGARD (V4.3.2,V5, V6), INEMA. 67
5.21. Evolución de emisiones de material particulado con resuspensión en Chile 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 67
5.22. Emisiones de CO2 en Colombia según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V7), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), IEA, PAPILA. 69
5.23. Emisiones de CO2–ciclo-orgánico en Colombia según inventarios internacionales (2005–2024), EDGAR (V5,V7), CAMS (V5.3, V6.2). . . 70
5.24. Emisiones de NOx en Colombia según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), PAPILA 71
5.25. Emisiones de BC en Colombia según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3, V6.2), PAPILA. 72
5.26. Emisiones de BC con resuspensión en Colombia según inventarios internacionales (1970–2018), EDGAR (V5,V6). 72

5.27. Evolución de emisiones de material particulado en Colombia 1970–2020, EDGARD (V5, V6), PAPILA. 73
5.28. Evolución de emisiones de material particulado con resuspensión en Colombia 1970–2018, EDGARD (V5, V6). 73

Introducción

El sector transporte desempeña un papel crítico en las emisiones que se liberan a la atmósfera, sin embargo, en la actualidad existe un vacío de información regional sobre estas. Por lo tanto, con el objetivo de tener una comprensión más profunda de las emisiones de cada país de América del Sur, se busca analizar los inventarios de datos disponibles para para identificar y comparar sus tendencias.

Resumen de Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar las tendencias de emisiones de compuestos contaminantes locales y globales del sector transporte en países de América del Sur.

Para cumplir con lo anterior se fijan los siguientes objetivos específicos para este trabajo:

- Realizar una revisión bibliográfica de bases de datos nacionales e internacionales sobre emisiones del sector transporte en América del Sur.
- Analizar las tendencias anuales de emisiones para el sector transporte en países de América de Sur, reportadas por fuentes internacionales (ECCAD, IEA).
- Analizar inventarios de datos locales y globales de emisiones reportados localmente en Chile, Brasil, Argentina y Colombia.
- Realizar un análisis comparativo entre las tendencias de emisiones contaminantes reportadas por los inventarios internacionales y de cada país analizado.

Capítulo 1

Estado del arte

Para analizar y luego comparar las tendencias de emisiones del sector de transporte, primero es necesario conocer las bases de datos internacionales y locales. En estas se deben buscar las emisiones de partículas, gases de efecto invernadero y gases reactivos para los países de América del Sur. En el primer apartado se presenta una descripción de las bases de datos internacionales, incluyendo el inventario de emisiones de compuestos atmosféricos y recopilación de datos auxiliares (ECCAD) y la agencia internacional de la energía (IEA). En el segundo apartado se presenta una descripción de las bases de datos locales que reportan emisiones del sector transporte disponibles en Chile, Argentina, Colombia y Brasil.

1.1. Bases de datos internacionales

1.1.1. Emisiones de compuestos atmosféricos y recopilación de datos auxiliares (ECCAD)

ECCAD es la base de datos de GEIA (iniciativa global de emisiones), esta proporciona un acceso fácil a las emisiones globales y regionales para distintos compuestos. También entrega información sobre las emisiones en diferentes intervalos de tiempo, como diario, mensual y anual, dependiendo del conjunto de datos [9].

ECCAD es desarrollado por el portal francés AERIS y ofrece la posibilidad de descargar datos de emisiones seleccionando un sector o una especie, además, tiene la opción de elegir una región específica [8]. ECCAD incluye distintas bases de datos como CAMS, CEDS, EDGAR, ECLIPSE, GEIA. La información se puede visualizar

como mapas, series de tiempo y una comparación de estos.

Los inventarios que contienen información de emisiones del sector transporte en América del Sur son las siguientes:

- EDGAR
  - EDGARv4.3.2
  - EDGARv5
  - EDGARv6
  - EDGARv7
- CAMS
  - CAMS-GLOB-ANT v5.3
  - CAMS-GLOB-ANT v6.2
- CEDS

1.1.2. Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica mundial (EDGAR)

El inventario EDGAR, que forma parte del catálogo de ECCAD, estima las emisiones inducidas por el hombre, para esto, se basa en factores de emisiones conocidos (FE) y un amplio espectro de datos el cual abarca las actividades humanas con gran detalle (AD). Esta información se obtiene de la literatura científica y datos nacionales de cada país. Básicamente, las "AD" se combinan con los "FE" y así se obtienen los datos de emisiones por fuente y país. [35].

EDGAR posee las emisiones de especies antropogénicas y cuenta con nueve versiones, al seleccionar una serie de tiempo se pueden descargar los datos. Esto proporciona una visión detallada y personalizada de las emisiones a nivel global y regional.

EDGAR V4.3.2

Esta versión de EDGAR proporciona datos para el sector de transporte por carretera (road transportation) y transporte terrestre fuera de carretera (non-road ground transportation). Los datos disponibles abarcan desde el año 1970 hasta 2012.

El transporte por carretera incluye las emisiones generadas por automóviles, camionetas, motocicletas, además de vehículos pesados como camiones y autobuses destinados a circular en vías públicas. Esta categoría también contempla aquellas emisiones asociadas al uso de convertidores catalíticos en vehículos de carretera. [21].

El transporte terrestre fuera de carretera hace referencia a los vehículos y equipos que se utilizan en actividades de transporte terrestre, pero que no circulan por carreteras pavimentadas convencionales. Incluye vehículos y maquinaria móvil utilizada en los sectores de agricultura, silvicultura, residencia y otros [22].

A continuación se muestran las emisiones en el sector transporte por carretera en América del Sur, en la figura se muestran las emisiones de carbono negro, material particulado, óxido de nitrógeno y dióxido de carbono.

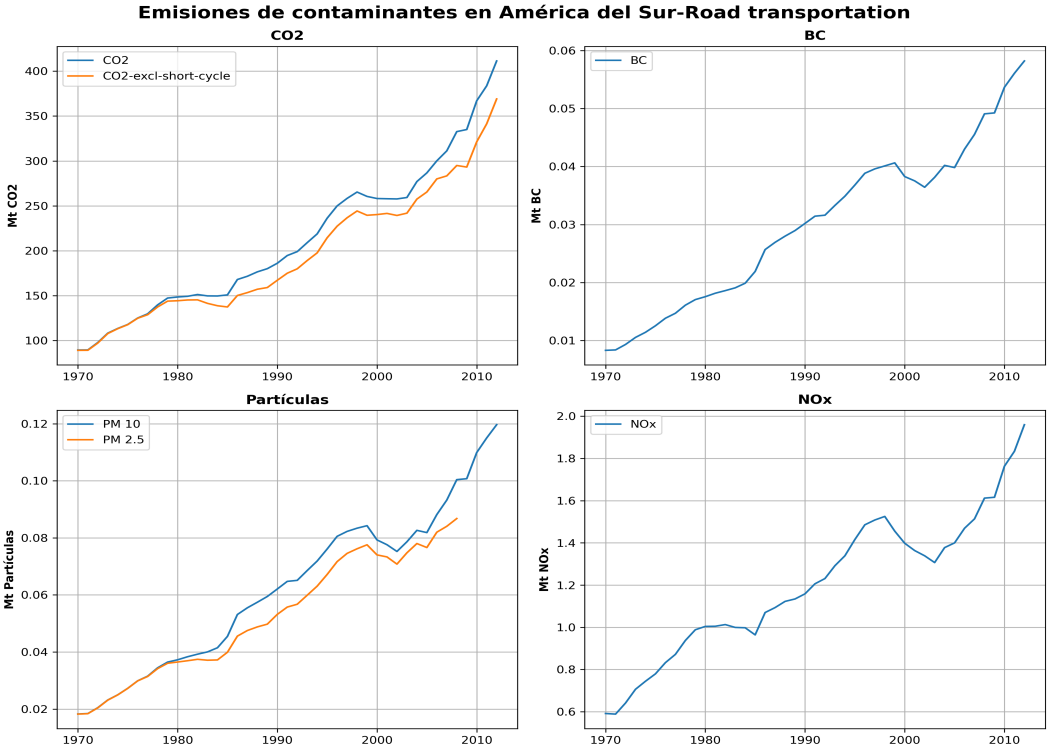


Figura 1.1: Emisiones de CO2,BC, PM10,PM2.5 y NOx en el sector transporte por carrtera en América del Sur, año 1970 a 2012, EDGARv4.3.2. [5].

En la figura CO2-excl-short-cycle se representa las emisiones de dióxido de carbono provenientes de fuentes no relacionadas con el ciclo de carbono corto, es decir, el CO2 proviene principalmente de fuentes geológicas o fósiles, como el petróleo, y tiene un tiempo de residencia atmosférica alto. Esta liberación de CO2 representa una

adición de contaminación al sistema climático, ya que no es fácilmente absorbido por los sumideros naturales [2].

EDGAR V5

La quinta versión de EDGAR contiene información del sector transporte por carretera y transporte terrestre fuera de carretera, los datos disponibles abarcan desde el año 1970 hasta 2018.

Para el transporte por carretera se tienen datos de emisiones de partículas cuando no existe resuspensión (todas las emisiones generadas por los vehículos en operación, excluyendo las partículas que se levantan del suelo) y cuando existe resuspensión (todas las emisiones generadas debido al levantamiento de partículas previamente depositadas en el suelo). Este inventario incluye las emisiones de gases de efecto invernadero, gases reactivos y partículas. A continuación se muestran las emisiones de carbono negro, material particulado, óxido de nitrógeno y dióxido de carbono en América del Sur.

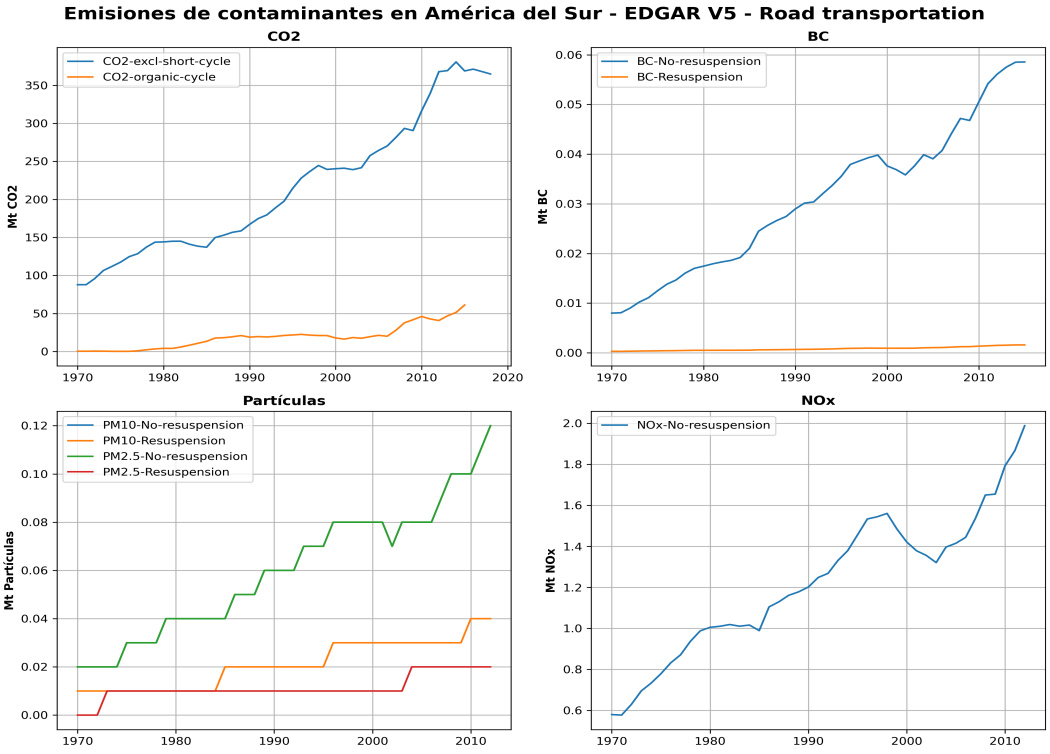


Figura 1.2: Emisiones de CO2, NOx, BC, PM10 y PM2.5, año 1970 a 2018, EDGARV5 [4].

CO2-organic-cycle se refiere a las emisiones que se forman a partir del ciclo corto natural del carbono, es decir, que circula rápidamente entre la atmósfera, los organismos vivos y los ecosistemas terrestres y que no representa una alta adición de CO2 al sistema climático [2].

EDGAR V6

La sexta versión de EDGAR contiene información del sector de transporte por carretera con y sin resuspensión, además, transporte terrestre fuera de carretera, los datos disponibles abarcan desde el año 1970 hasta 2018.

Esta base de datos incluye información de emisiones de gases reactivos y partículas. En la figura 1.3 se muestran las emisiones de carbono negro, material particulado y óxido de nitrógeno para el sector transporte por carretera.

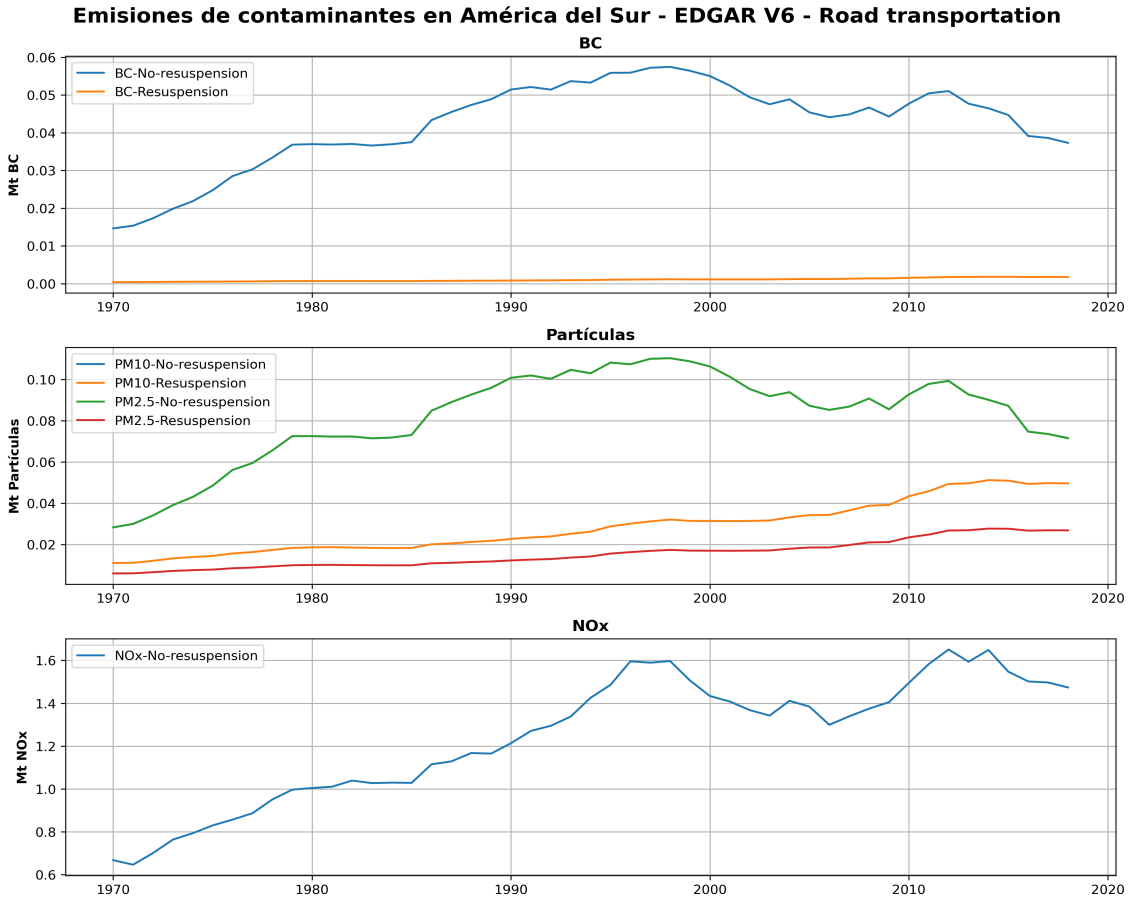


Figura 1.3: Emisiones de NOx, BC, PM10 y PM2.5, año 1970 a 2018, EDGARV6 [7].

EDGAR V7

Esta versión de EDGAR contiene información del sector de transporte por carretera sin resuspensión, además, transporte terrestre fuera de carretera, los datos disponibles abarcan desde el año 1970 hasta el 2021. En este inventario solo se incluye información de gases de efecto invernadero. En la figura se muestran las emisiones de dióxido de carbono en el sector transporte por carretera sin resuspensión en América del Sur.

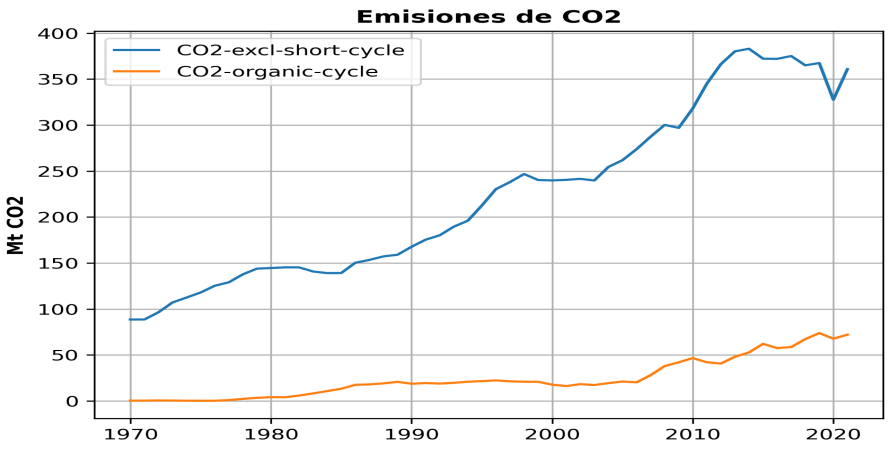


Figura 1.4: Emisiones de CO2, año 1970 a 2021, EDGARV7 [6].

1.1.3. Sistema comunitario de datos de emisiones (CEDS)

Este inventario fue desarrollado por el instituto sobre el cambio global del laboratorio nacional del noreste pacífico y la universidad de Maryland. CEDS incorpora datos de emisiones y actividad de otras fuentes como EDGAR, además de bases de datos locales, todo esto con el fin de generar emisiones globales y locales que sean coherentes [23]. La base de datos se puede encontrar en el catálogo de ECCAD, este solo posee una versión y entrega las emisiones de especies antropogénicas para ocho sectores (energía, agricultura, transporte, desperdicios, residencia, solventes, industrias, embarcaciones). Los datos abarcan entre el año 1950 hasta 2019.

Para el sector transporte el inventario CEDS contiene las emisiones de gases de efecto invernadero, gases reactivos y partículas (BC y OC). La figura 1.5 muestra las emisiones de CO2, NOx y BC para el sector transporte.

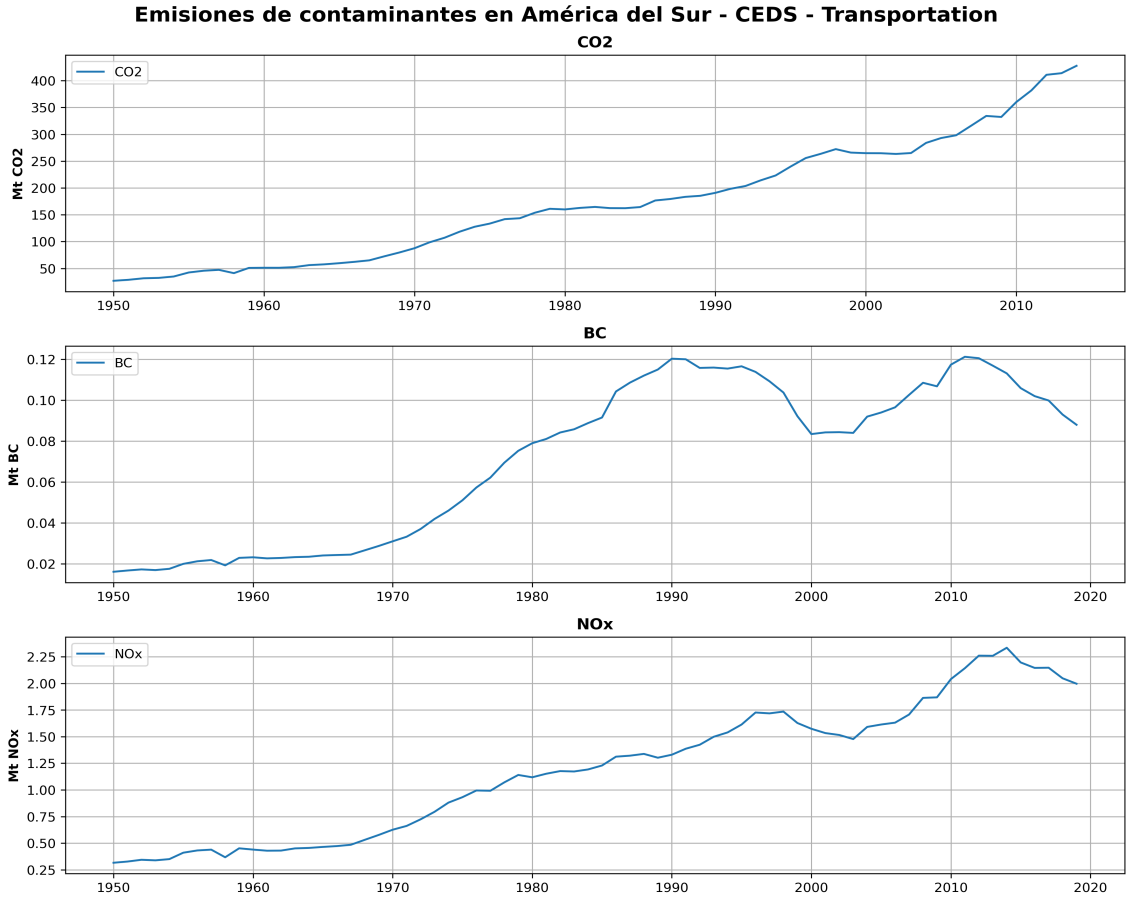


Figura 1.5: Emisiones de CO2, BC, NOx en el sector transporte por carretera en América del Sur, año 1950 a 2019, CEDS [34] [27].

1.1.4. Servicio de vigilancia de la atmósfera de copernicus (CAMS)

La base de datos CAMS entrega información a nivel global y regional sobre la calidad del aire, emisiones de contaminantes, quema de biomasa, energía solar y radiación UV. El inventario usa la infraestructura operativa y las herramientas de modelamiento del centro europeo de prevenciones meteorológica a medio plazo (ECMWF) y los factores de emisión de EDGAR para generar pronósticos globales casi en tiempo real de la composición atmosférica [29].

CAMS pertenece al catálogo de ECCAD, este posee once versiones las cuales están agrupadas entre CAMS-GLOBAL y CAMS-REGIONAL, la base de datos facilita las emisiones para 91 sectores.

CAMS-GLOB-ANT:

Las versiones 5.3 y 6.2 de CAMS contienen información de emisiones en transporte por carretera, se tiene una cobertura desde el año 2000 hasta 2024. En la figura 1.6 se muestran las emisiones de carbono negro, óxido de nitrógeno y dióxido de carbono para el sector transporte por carretera,

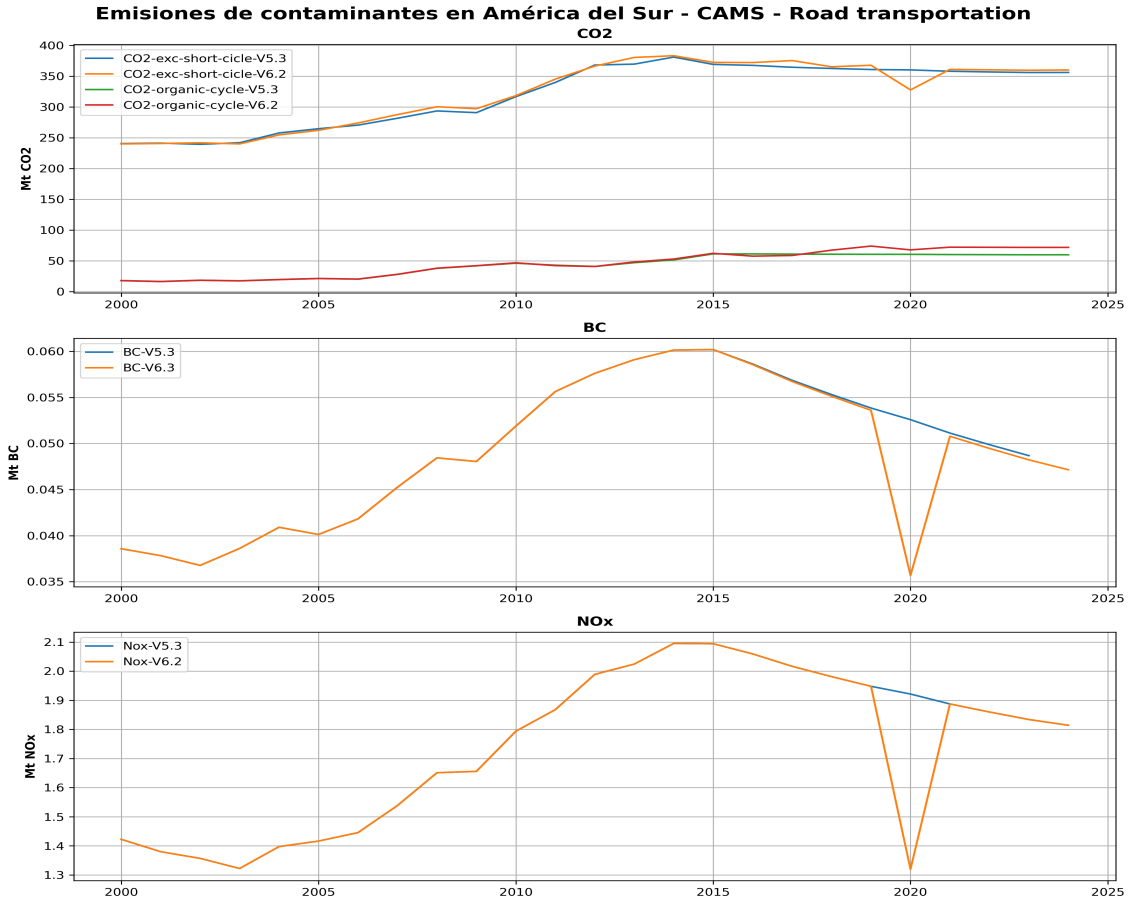


Figura 1.6: Emisiones de CO2, BC y NOx en el sector transporte por carretera en América del Sur, año 2000 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [14] [36].

CAMS-REG-ANT:

En el sector de transporte por carretera contiene las emisiones de gases de efecto invernadero, gases reactivos y partículas (PM2.5, PM10), se tienen datos desde el año 2000 hasta 2022. Solo presenta información para las regiones europeas [14] [36].

1.1.5. Agencia internacional de la energía (IEA)

La IEA se encarga de garantizar el suministro seguro y sustentable de energía para todos los países. Entre sus áreas de estudio se encuentra las energías renovables, la oferta y demanda de petróleo, gas y carbón, la eficiencia energética, las tecnologías de energía limpia, los sistemas y mercados eléctricos, el acceso a la energía, la gestión de la demanda y mucho más. Actualmente Chile, Brasil, Colombia y Argentina son los únicos países de América del Sur que pertenecen a la IEA. [13].

La IEA ofrece estadísticas energéticas sobre la oferta y la demanda, además de otros indicadores clave relacionados con la energía, esto con el fin de permitir trabajos de modelación y el seguimiento de los cambios a corto y largo plazo de las transiciones energéticas de los países, en especial las energías limpias. [19]. En la página web se encuentra un manual para el correcto análisis de los datos estadísticos, en esta también se pueden descargar reportes.

Recientemente la IEA publicó el reporte de las perspectivas energéticas de Latinoamérica, el cual es un análisis exhaustivo y profundo sobre la región, y abarca toda la gama de combustibles y tecnologías energéticas en los países. En este informe se llegó a la conclusión de que para disminuir las emisiones de CO2 se debe acelerar la adopción de energías renovables, avanzar en la electrificación de la industria, impulsar la eficiencia energética para moderar el crecimiento de la demanda e impulsar el acceso a soluciones limpias para cocinar y en cuanto al transporte se debe impulsar la electro movilidad [18].

El reporte “perspectivas energéticas de Latinoamérica” indica que el 95 % del consumo de energía en el sector transporte en la región corresponde al transporte por carretera, en este el 10 % de la demanda energética pertenece a biocombustibles. [10]

1.1.6. Conclusiones

- En el Inventario ECCAD, las bases de datos que tienen información sobre las emisiones de BC y NOx en América del Sur son EDGAR (V4.3.2, V5, V6), CEDS y CAMS (V5.3 y V6.2), mientras que la información de PM10 y PM2.5 proviene de EDGAR (V4.3.2, V5 y V6).

- Los inventarios EDGAR (V5, V7) y CAMS (V5.3 y V6.2) muestran las emisiones de CO2 excluyendo el ciclo de carbono corto y el CO2 formado a partir del ciclo natural del carbono. Por otro lado el inventario CEDS presenta las emisiones de CO2 en su conjunto, sin distinguir explícitamente entre sus fuentes.

- Al comparar los datos, se observa que las emisiones clasificadas como CO2-organic-cycle son significativamente menores, mientras que las emisiones CO2-excl-short-cycle se asemejan más a los valores totales reportados por CEDS.

- EDGAR V4.3.2 entrega las emisiones de CO2 totales y excluyendo el ciclo de carbono corto, comparando los gráficos se nota que no existe una gran diferencia entre los datos.

- Aunque los valores reportados por EDGAR, CEDS y CAMS presentan diferencias en valores y cobertura temporal, las estimaciones de emisiones se mantienen dentro de un rango comparable.

- En el año 2020 los datos varían entre CAMS V5.3 y V6.2, pues la versión 5.3 no refleja el efecto de la pandemia.

- En el año 2004, para las emisiones de PM2.5, PM10 y NOx, los valores de EDGAR V6 disminuyen, a diferencia de EDGAR V4.3.2 y V5, que no presentan esta tendencia.

1.2. Bases de datos locales disponibles

Actualmente, los inventarios de emisiones elaborados por cada país de América del Sur se enfocan principalmente en los gases de efecto invernadero (GEI), también, estos inventarios suelen abarcar un mínimo de sectores, como el consumo de energía, el transporte urbano y la industria.

1.2.1. Argentina

En Argentina existen diversas bases de datos que registran las emisiones al ambiente. Entre ellas se destacan el centro de información ambiental (CIAM) y el sistema integrado de información ambiental (SInIA), los cuales ponen a disposición del público información detallada sobre distintos componentes ambientales, incluyendo el agua, el suelo, la biodiversidad, los bosques, los residuos y los gases de efecto invernadero.

El sitio web del SInIA, el cual depende de la subsecretaría de ambiente, ofrece informes sobre el estado de la atmósfera, además de un portal de datos donde es posible descargar información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero en Argentina para el período entre 1990 y 2020. Estos datos están organizados por sectores, como agricultura, aguas residuales, cambio de uso del suelo, combustibles en industrias, combustibles en otros sectores, combustibles residenciales, emisiones fugitivas, fabricación de combustibles, ganadería, generación de electricidad, procesos industriales y residuos sólidos urbanos. Toda esta información se encuentra disponible para su descarga en formato CSV [24].

En 2018, se publicó en Argentina el inventario de emisiones atmosféricas del sector energético argentino (GEAA). Este inventario constituye una fuente valiosa de información ambiental al proporcionar datos anuales sobre emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de diversas fuentes [30].

1.2.2. Brasil

En Brasil los inventarios de datos existentes se centran en los gases de efecto invernadero, la plataforma SEEG proporciona las emisiones de gases efecto invernadero por año para todas las regiones . El inventario entrega gráficas de áreas, líneas y columnas.

En el sitio web del SEEG se puede acceder a un mapa interactivo el cual muestra las emisiones correspondientes en cada zona geográfica del país [11]. Los datos disponibles abarcan el período comprendido entre 1990 y 2023, y presentan las emisiones de CO2 en sectores como agropecuaria,comercial , generación de electricidad (servicio público), industrial, producción de combustibles, residencial y transporte.

El Instituto de energía y medio ambiente (IEMA) es una organización brasileña fundada en 2006. Su labor se centra en la generación y difusión de conocimiento técnico y científico relacionado con la contaminación del aire, la movilidad urbana, la energía, los combustibles, el transporte sostenible y la reducción de gases de efecto invernadero [3].

En relación al sector transporte, IEMA señala que los camiones, autobuses y otros vehículos diésel son la principal fuente de emisiones de carbono negro. Además, la institución propone que, para tener la posibilidad de limitar el calentamiento global , es necesario reducir las emisiones de carbono negro en todos los sectores al menos en un 35 % respecto a los niveles de 2010 para el año 2050.

Por otro lado en 2018 los estudios de Andrade [1] e Ibarra-Espinosa [15] contribuyeron significativamente en el desarrollo de inventarios urbanos de emisiones vehiculares y su impacto en la calidad del aire en Brasil. Andrade estudio la calidad del aire en el sureste de Brasil, mientras que Ibarra-Espinosa desarrollaron un sistema para estimar emisiones vehiculares en ciudades del país.

1.2.3. Chile

El registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC) es una base de datos de dominio público que se encarga de capturar, recopilar, sistematizar, conservar, analizar y difundir las emisiones de contaminantes producidas por actividades industriales o no industriales [25].

En su página web, es posible descargar los datos en formato Excel o CSV, se dispone de inventarios de emisiones de distintos contaminantes asociados al sector transporte, con información que abarca desde el año 2005 hasta 2023. Entre los contaminantes registrados se encuentran los compuestos orgánicos volátiles, dióxido de azufre (SO2), dióxido de carbono (CO2), hidrocarburos totales, material particulado, mercurio, metano (CH4), monóxido de carbono, PM10, PM2.5, nitrógeno amoniacal (NH3) y óxidos de nitrógeno (NOx). Estos datos están desagregados por regiones, provincias, ciudades y comunas, lo que permite un análisis detallado a nivel territorial.

El sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero de Chile (SNI) es una plataforma administrada por la división de cambio climático del ministerio del medio ambiente, su objetivo es recolectar y difundir la información relativa a las emisiones de gases de efecto invernadero que produce el país, con el fin de cumplir tanto con los compromisos nacionales como con los informes periódicos requeridos por la convención de las naciones unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) [26].

La INEMA elaboró un documento el cual analizó las emisiones generadas por el transporte terrestre en Chile durante el período 1990-2023. Las estimaciones se realizaron a nivel regional, considerando variables como el parque vehicular, la actividad automovilística y el consumo de combustible. Para ello, se utilizaron datos provenientes de fuentes oficiales, entre ellas el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), el sistema de combustibles del SCSS, el programa MAPS y la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), los cuales aportaron información sobre la flota vehicular, el kilometraje recorrido y las ventas de combustibles.

1.2.4. Colombia

En Colombia el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) entrega datos de calidad del aire y realiza estudios e investigaciones sobre el medio ambiente. La IDEAM elaboró un inventario nacional de gases de efecto invernadero, el cual es una herramienta fundamental para monitorear el comportamiento de las emisiones y absorciones de GEI en el país, este cubre desde 1990 hasta 2021 con metodologías alineadas al IPCC 2006, incluye gases como CO2, CH4 y N2O, y abarca sectores como energía, agricultura, industria, residuos y uso de la tierra [16].

En el año 2012, se presentó un inventario de emisiones específico para la ciudad de Bogotá [28], este fue elaborado con el objetivo de identificar las principales fuentes emisoras en la capital. El inventario incluye emisiones móviles, industriales, comerciales, biogénicas y polvo resuspendido para la ciudad.

Por otro lado, la ciudad de Santiago de Cali también desarrolló su propio inventario de emisiones de GEI, el cual fue publicado por la corporación autónoma regional del valle del cauca (CVC) en 2018 y donde se incluye el sector transporte [12].

En 2023 se publicó el artículo "Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990-2020 trends and spatial disaggregation" [32], el cual presenta un inventario detallado de las emisiones generadas en el sector transporte por carretera en Colombia durante el período entre 1990 a 2020. En este estudio se estiman las emisiones de contaminantes atmosféricos tales como CO2, NOx y BC, además, se realiza una comparación entre los datos estimados y los inventarios globales EDGAR (V4.3.2 y V6), CAMS y CEDS.

Una de las principales conclusiones del estudio es que las emisiones de CO2 aumentaron en un 63 % durante dicho período, mientras que las de NOx disminuyeron, principalmente como resultado de la adopción de tecnologías vehiculares más limpias.

1.2.5. Conclusiones

- Argentina
  - CIAM y SInIA ponen a disposición información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero para distintos sectores, incluyendo transporte, en un periodo comprendido entre 1990 y 2020.
  - En 2018, se publicó el inventario de emisiones atmosféricas del sector energético argentino, el cual proporciona datos sobre las emisiones de contaminantes para el sector transporte y otros.
- Brasil
  - Los inventarios existentes se enfocan principalmente en los gases de efecto invernadero.
  - El SEEG proporciona datos anuales de emisiones para todas las regiones de Brasil y para diversos sectores, incluyendo transporte.
  - Se han realizado varios estudios sobre emisiones vehiculares en distintas ciudades, pero no se ha encontrado un estudio único a nivel nacional.
- Chile
  - El registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC) es una base de datos pública que recopila y difunde las emisiones de contaminantes como CO2, NOx, MP10 y MP2.5 en el sector transporte por carretera.
  - Los datos de la RETC abarcan desde el año 2005 hasta 2021 y están organizados por regiones, provincias, ciudades y comunas.
  - El Sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero de Chile (SNI) recopila las emisiones de gases de efecto invernadero.
  - El estudio INEMA calculó las emisiones generadas por el transporte en Chile durante el período 1990 hasta el 2023.
- Colombia
  - IDEAM elaboró un inventario nacional de gases de efecto invernadero, este cubre desde 1990 hasta 2021.

- El artículo “Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation” [32], publicado en 2023, presenta las emisiones generadas por el transporte por carretera en Colombia.

Capítulo 2

Metodología

Este apartado describe la metodología de acceso, filtrado y descarga de datos desde distintas plataformas internacionales y nacionales que proveen inventarios de emisiones atmosféricas en el sector transporte.

En primer lugar, se detalla el acceso a la plataforma ECCAD, incluyendo el registro y la navegación por los inventarios pertenecientes a esta. En segundo lugar, se aborda la descarga de datos de gases de efecto invernadero desde el portal de la IEA. Finalmente, se presenta la metodología de recopilación de datos desde los inventarios nacionales de Argentina, Brasil, Chile y Colombia, especificando las fuentes institucionales utilizadas (SInIA, SEEG, INGEI, INEMA y PAPILA) y los pasos necesarios para acceder a la información.

2.1. ECCAD

Primero, es necesario crear una cuenta en línea en el portal ECCAD, en la figura 2.1 se detallan los requisitos para el registro. La cuenta es de acceso público, por lo tanto, cualquier persona puede crearla y así acceder a los inventarios disponibles en la plataforma.

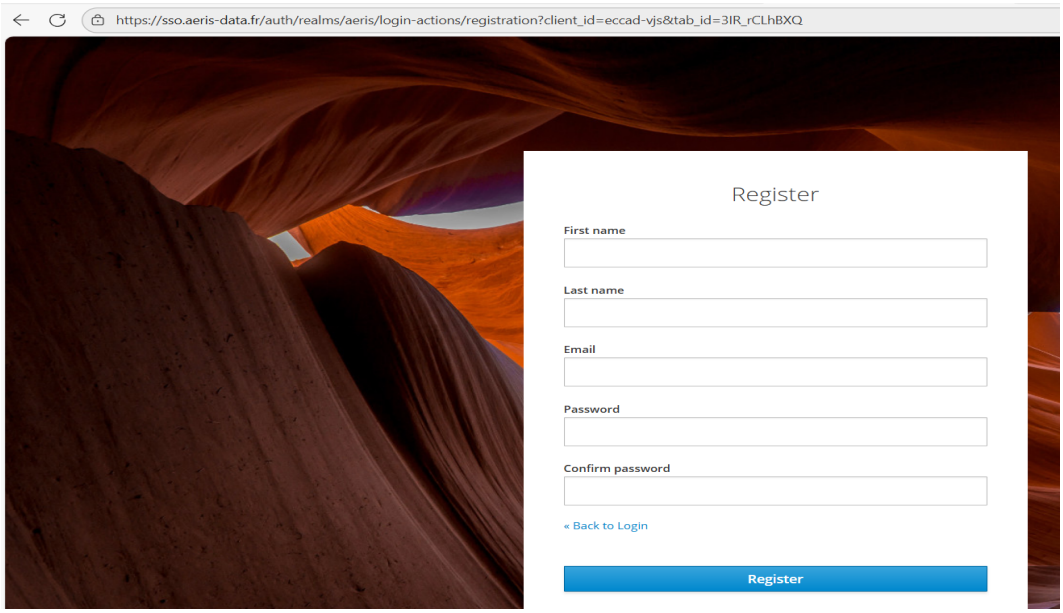


Figura 2.1: Datos de registro para el portal ECCAD.

Una vez creada la cuenta, se accede a la sección "Data Access"; esta muestra el conjunto de inventarios disponibles, incluyendo las especies contaminantes, los sectores emisores, ademas de la cobertura temporal y geográfica de los datos. Posteriormente, se debe ingresar a la sección "Data y Tools", donde es posible seleccionar los conjuntos de datos de interés.

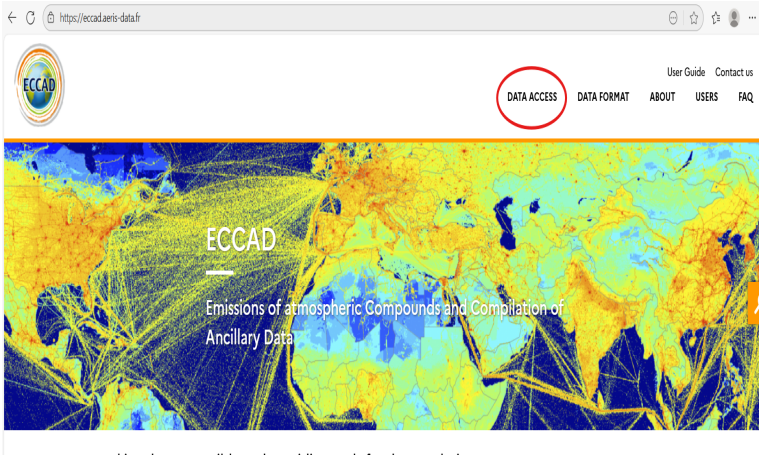


Figura 2.2: Vista general acceso a ECCAD

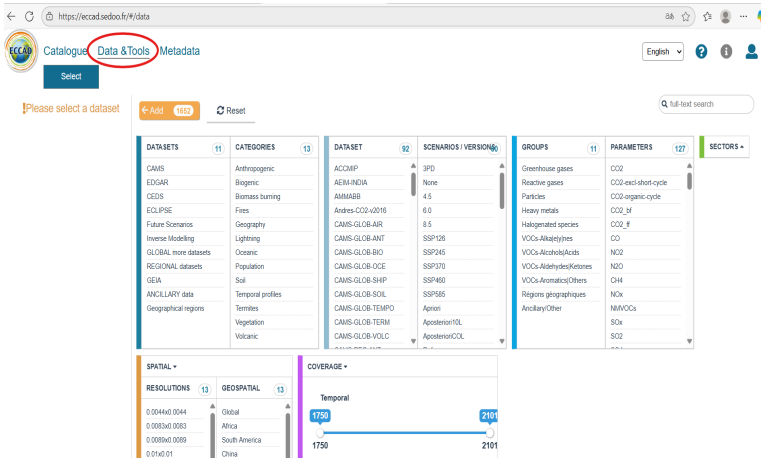


Figura 2.3: Panel de filtrado para elegir inventario de datos, especies, sectores, cobertura temporal y geográfica.

Una vez en la interfaz de filtrado de datos, se debe realizar la selección siguiendo la secuencia: Inventario >Versión >Tipo de contaminante >Sector. Tras definir los parámetros deseados, se debe utilizar la función “Add” para incorporar la selección al conjunto de análisis, luego se debe hacer clic en “Time Series” para visualizar las series temporales correspondientes.

En la figura 2.4 se ha seleccionado el inventario EDGAR >V7 >Gases de efecto invernadero >Sector transporte, este procedimiento debe repetirse para los inventarios EDGAR, CAMS y CEDS considerando sus respectivas versiones.

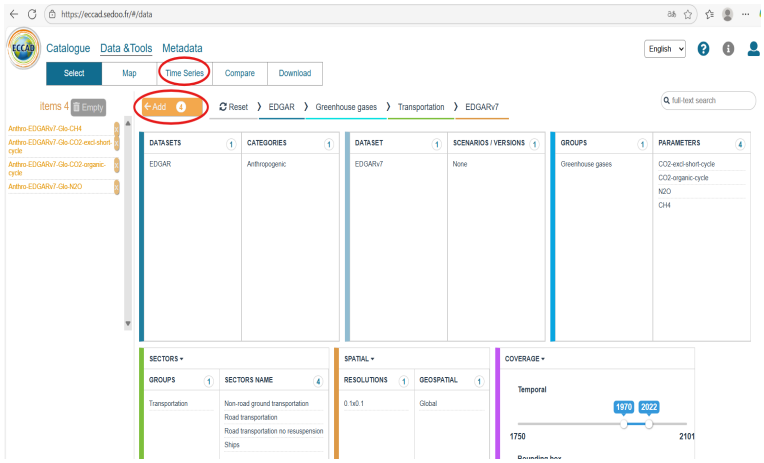


Figura 2.4: Interfaz de selección de parámetros de análisis temporal de cada inventario.

Una vez visualizada la serie de tiempo, se procede a seleccionar el contaminante de interés. además, en la sección “Regional”, se debe aplicar el filtro por país. Luego, en el apartado “Regions”, se debe seleccionar específicamente Argentina, Brasil, Chile y Colombia, simultáneamente, en la sección “Sectors”, se debe elegir el sector transporte.

Con estos filtros aplicados, se genera el gráfico correspondiente en línea. Si los datos visualizados son correctos, estos se pueden descargar directamente desde el ícono ubicado en la esquina superior derecha del gráfico. La figura 2.6 muestra la ubicación de esta opción de descarga.

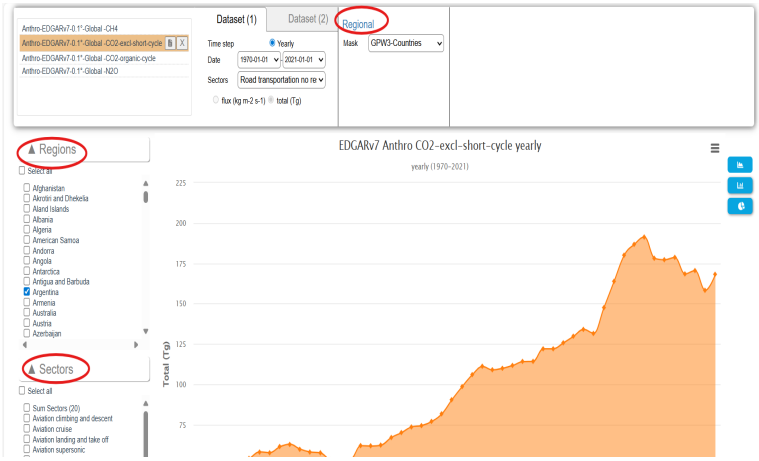


Figura 2.5: Interfaz de selección de países y sectores para descarga de datos plataforma ECCAD.

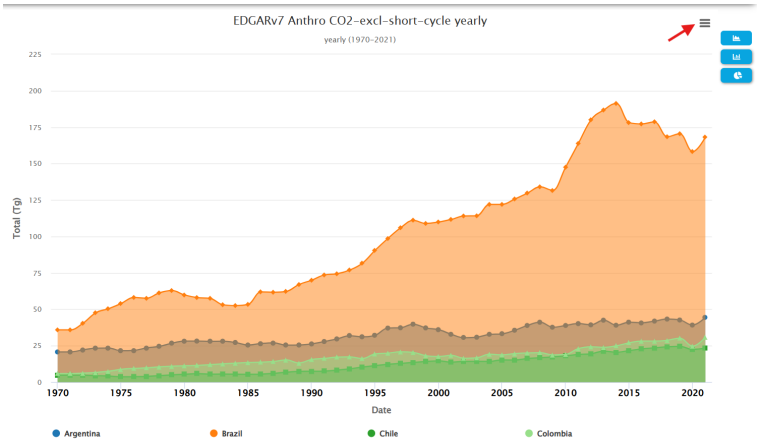


Figura 2.6: Grafica online entregada por ECCAD y ubicación de descarga de datos.

2.2. IEA

Para comenzar, es indispensable registrarse en el portal en línea de la IEA, el registro está abierto al público general, por ende, cualquier usuario puede acceder a los datos de la plataforma.

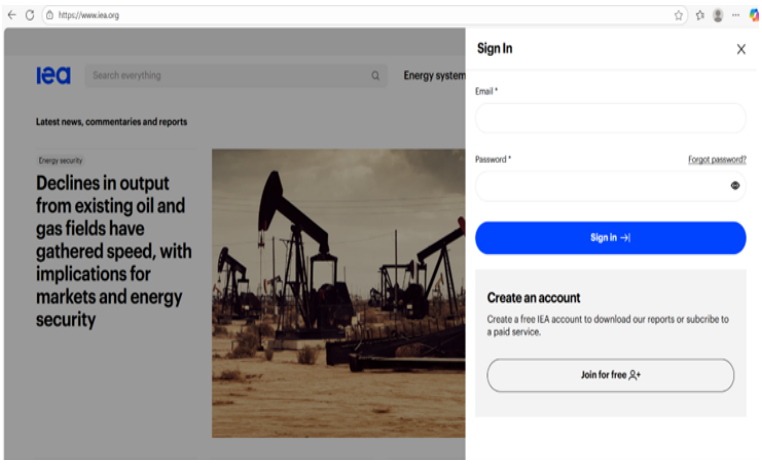


Figura 2.7: Acceso portal IEA.

Una vez creada la cuenta se debe acceder al apartado “Countries” y seleccionar el país para el cual se desea consultar los datos, a nivel sudamericano, solo se tiene disponible información de Chile, Colombia, Brasil y Argentina. Tras seleccionar uno de estos países, se debe ingresar a la sección “Emissions” y localizar la gráfica mostrada en la figura 2.9, desde allí, es posible descargar los datos.

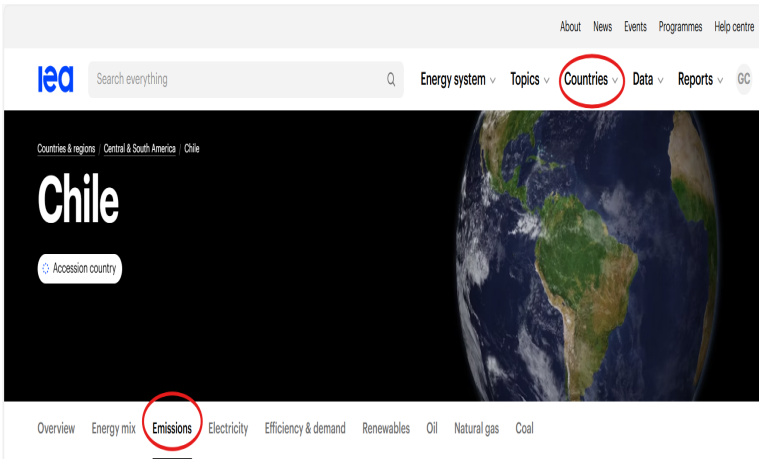


Figura 2.8: Interfaz de selección de países portal IEA.

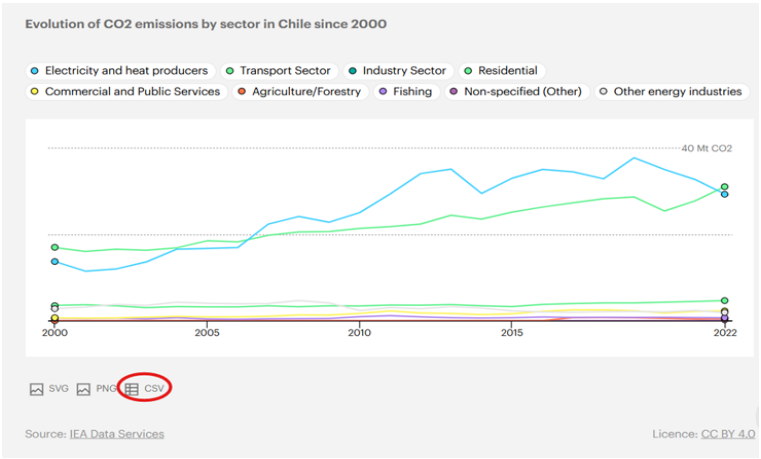


Figura 2.9: Grafica entregada por IEA para descarga de datos.

2.3. Inventarios nacionales

Cada país dispone de plataformas institucionales que reportan las emisiones atmosféricas, a continuación, se detallan los procedimientos aplicados para la recopilación de datos desde los inventarios de Argentina, Brasil, Chile y Colombia.

2.3.1. Argentina

En el portal SInIA, se debe acceder a la sección Datos >Impacto climático >Emisiones anuales de GEI por subsector, desde donde es posible descargar los datos correspondientes. Las siguientes figuras presentan una captura de la interfaz.

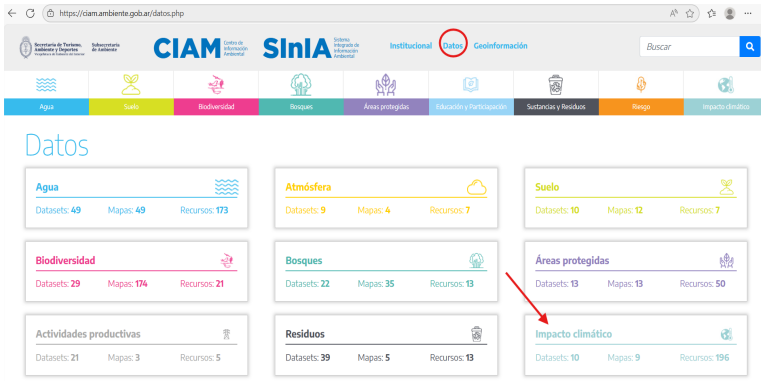


Figura 2.10: Acceso a datos portal SInIA

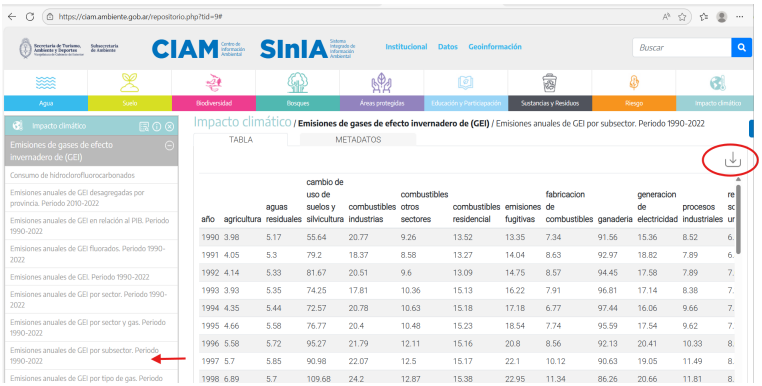


Figura 2.11: Descarga de datos portal SInIA

2.3.2. Brasil

Para acceder a los datos específicos en el portal SEEG, es necesario seguir una secuencia precisa de navegación, primero se debe ubicar y seleccionar la opción correspondiente a “Emisiones Brutas”, una vez dentro de esta sección, se debe elegir el apartado “Categoría Emisora”, que organiza la información según sectores, finalmente se debe aplicar los filtros para la selección del contaminante.

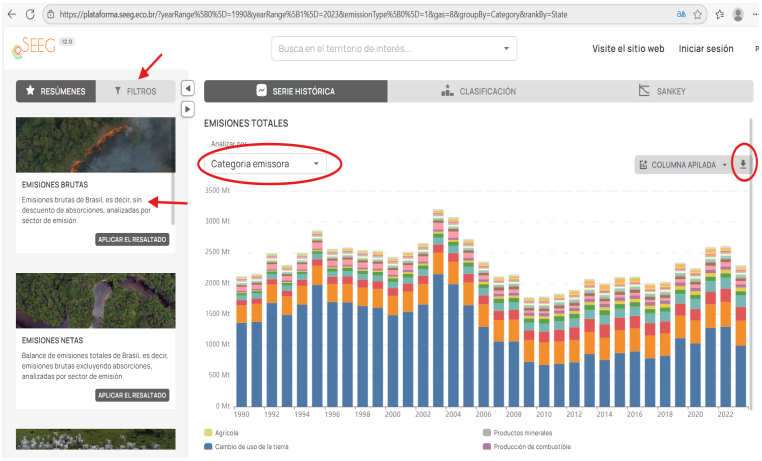


Figura 2.12: Visualización de emisiones en plataforma SEEG

2.3.3. Chile

Los datos correspondientes a Chile fueron extraídos de diversas fuentes oficiales, las cuales incluyen el INGEI e INEMA. Estas fuentes proporcionan series temporales de emisiones, metodologías de estimación y reportes asociados a los compromisos

climáticos del país.

Para la descarga de datos en el portal del ministerio, primero se debe acceder a la sección denominada INGEI, luego se debe seleccionar “Sector Energía”, el cual concentra las emisiones asociadas al consumo y producción energética en el país. En la figura 2.13 se muestra una captura del sitio web oficial.



Figura 2.13: Visualización portal INGEI para descarga de datos.

2.3.4. Colombia

Los datos correspondientes a Colombia fueron extraídos específicamente del documento elaborado por el proyecto PAPILA, el cual proporciona información detallada sobre emisiones y metodologías aplicadas en el país.

Capítulo 3

Análisis de tendencias anuales de emisiones para el sector transporte

A continuación se presenta un análisis de los inventarios internacionales de emisiones en países de América del Sur, esto se realiza con el objetivo de evaluar las tendencias de emisión de gases de efecto invernadero, reactivos y partículas.

En el primer apartado se detallan los datos de emisiones de contaminantes atmosféricos correspondientes a Chile, Colombia, Brasil y Argentina. Estos datos han sido obtenidos de la base de datos ECCAD , la cual proporciona información espacial y temporalmente distribuida sobre diversos compuestos emitidos a la atmósfera. El segundo apartado está dedicado al análisis comparativo de las emisiones en la región, utilizando los registros reportada por ECCAD, esto se realiza con el objetivo de identificar las discrepancias, coincidencias y tendencias en los datos. Finalmente, el tercer apartado muestra los datos de emisiones recopilados por la agencia internacional de energía (IEA).

3.1. Emisiones de compuestos atmosféricos y recopilación de datos auxiliares (ECCAD)

La base de datos ECCAD, parte de la iniciativa global de emisiones (GEIA) facilita el acceso a información sobre emisiones globales y regionales de diversos compuestos, además, proporciona datos en intervalos de tiempo mensual y anual [9].

3.1.1. Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica mundial (EDGAR)

El inventario EDGAR, parte del catálogo ECCAD, estima las emisiones antropogénicas. Este cuenta con nueve versiones disponibles, permite descargar datos específicos por fuente y país, proporcionando una visión detallada de las emisiones a nivel global y regional.

EDGAR V4.3.2

Para América del Sur, los datos disponibles corresponden únicamente a Chile y Argentina, cubriendo un periodo desde 1970 hasta el año 2012. En la figura se muestran las emisiones en el sector transporte por carretera, en esta se nota que los valores de PM10 y PM2.5 son iguales para los dos países.

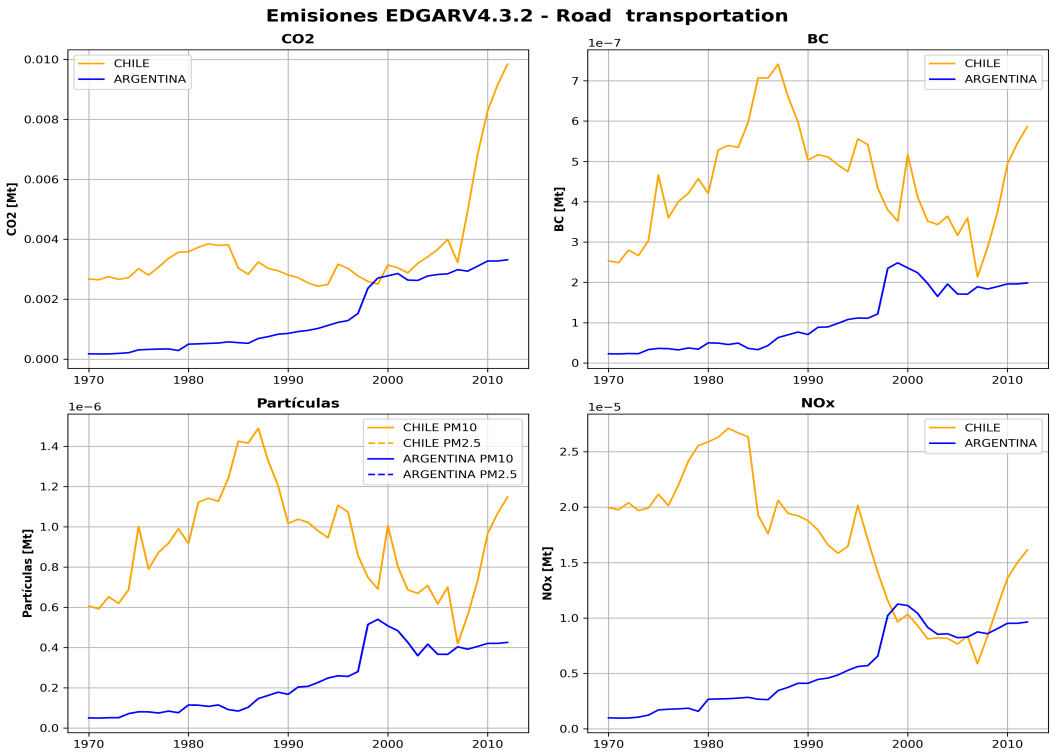


Figura 3.1: Emisiones de CO2, NOx, BC, PM10 yPM2.5 en el sector transporte por carretera en Chile y Argentina, año 1970 a 2012, EDGARv4.3.2. [5].

EDGAR V5

Los datos de esta versión abarcan desde el año 1970 hasta 2015 y cuenta con los cuatro países de la región. En las siguientes figuras se muestran los datos de emisiones para el sector transporte para Chile, Brasil, Argentina y Colombia, además, para una visión más exacta se muestran las gráficas excluyendo Brasil.

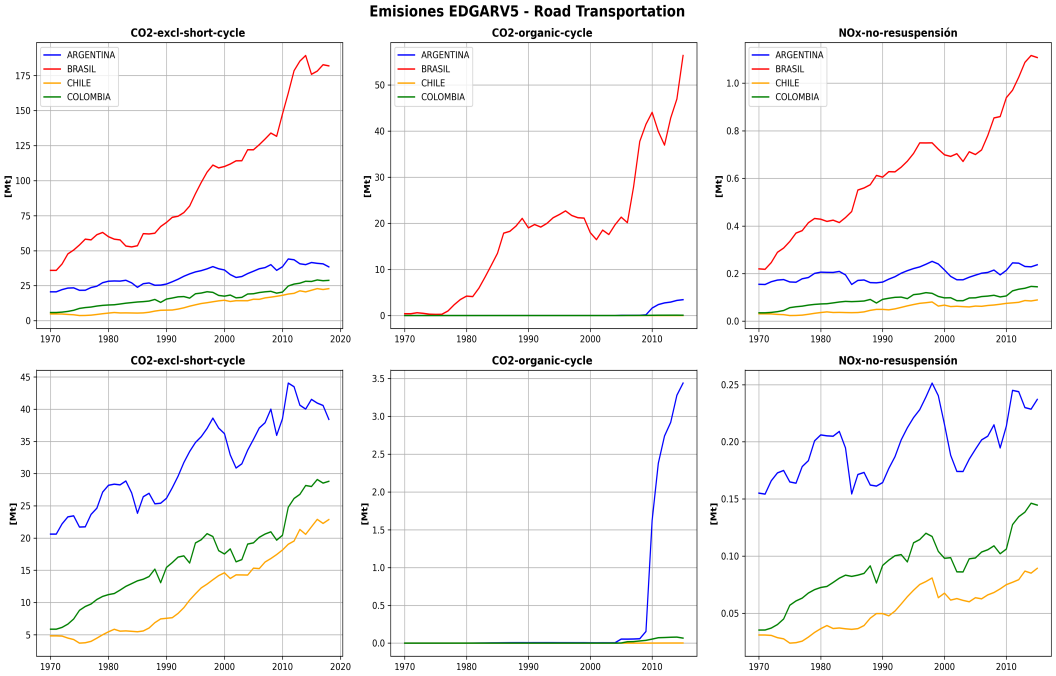


Figura 3.2: Emisiones de CO2 y NOx para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2015, EDGARv5 [4].

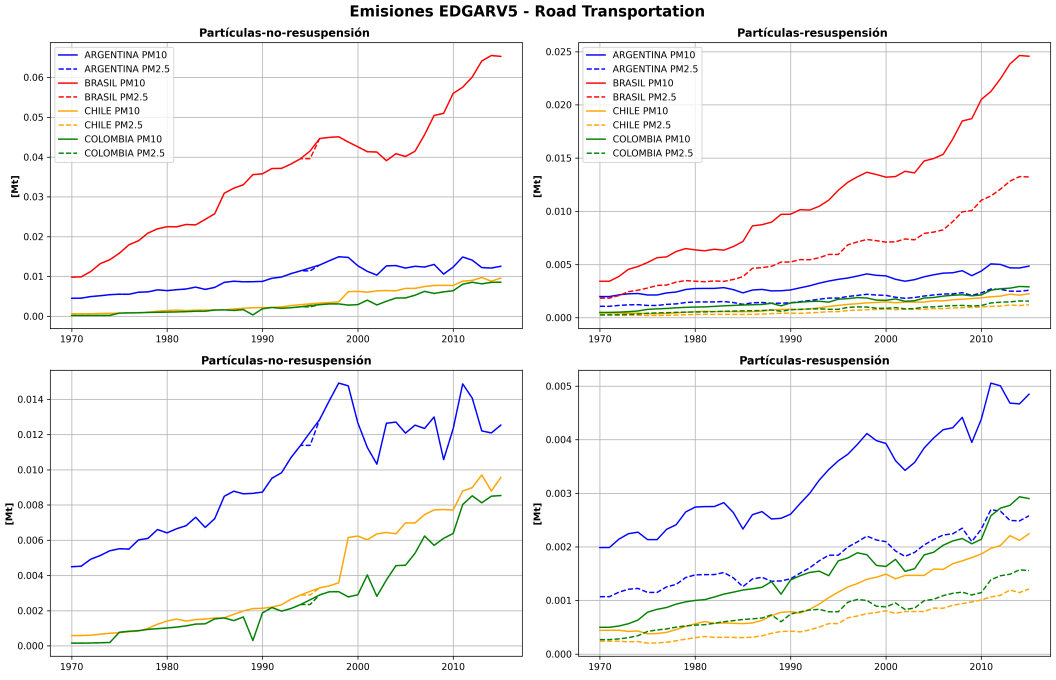


Figura 3.3: Emisiones de PM10 y PM2.5 para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2015, EDGARv5 [4].

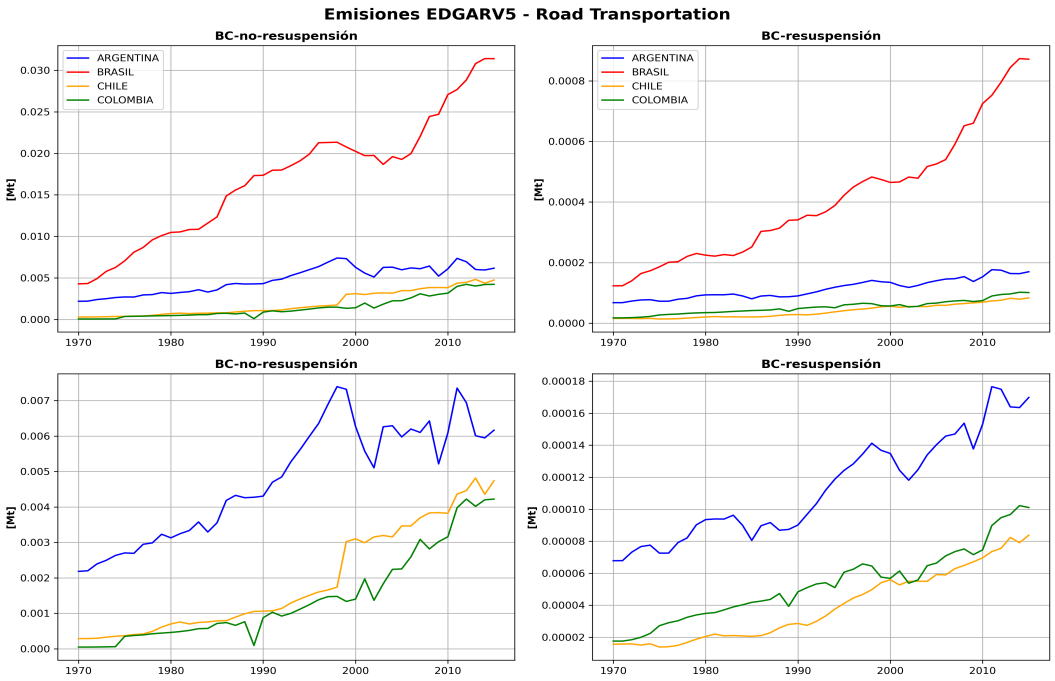


Figura 3.4: Emisiones de BC para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2015, EDGARv5 [4].

EDGAR V6

Los datos disponibles en la región abarcan desde el año 1970 hasta 2018. En las siguientes figuras se muestran las emisiones de PM10, PM2.5, BC y NOx en el sector transporte por carretera para Chile, Brasil, Argentina y Colombia. En esta versión no se tienen datos de CO2 para países de América del Sur.

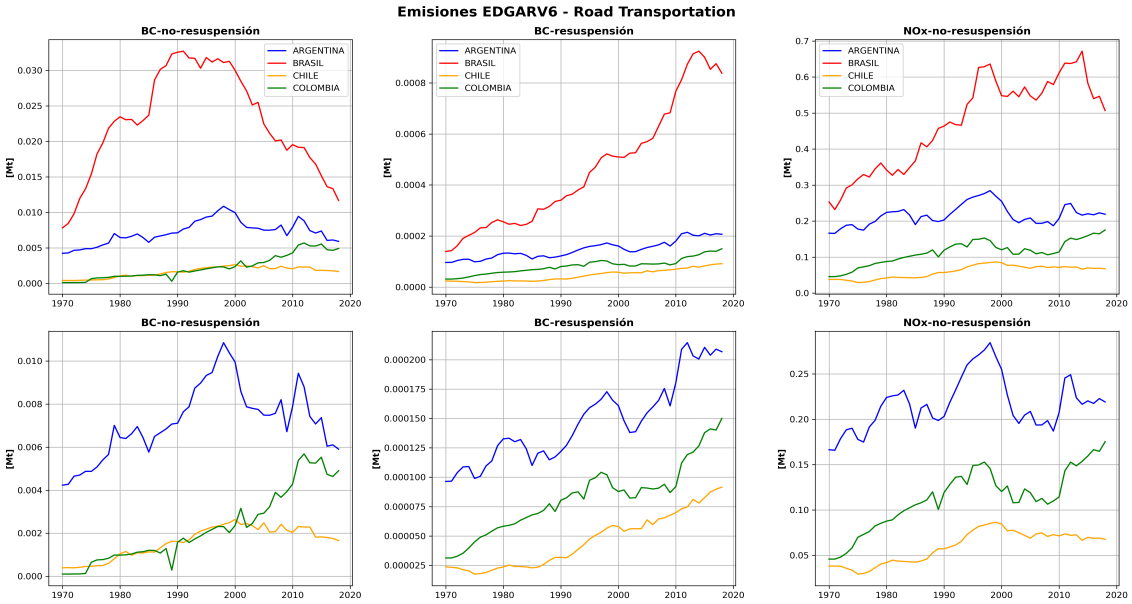


Figura 3.5: Emisiones de BC y NOx para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2018, EDGARv6 [7].

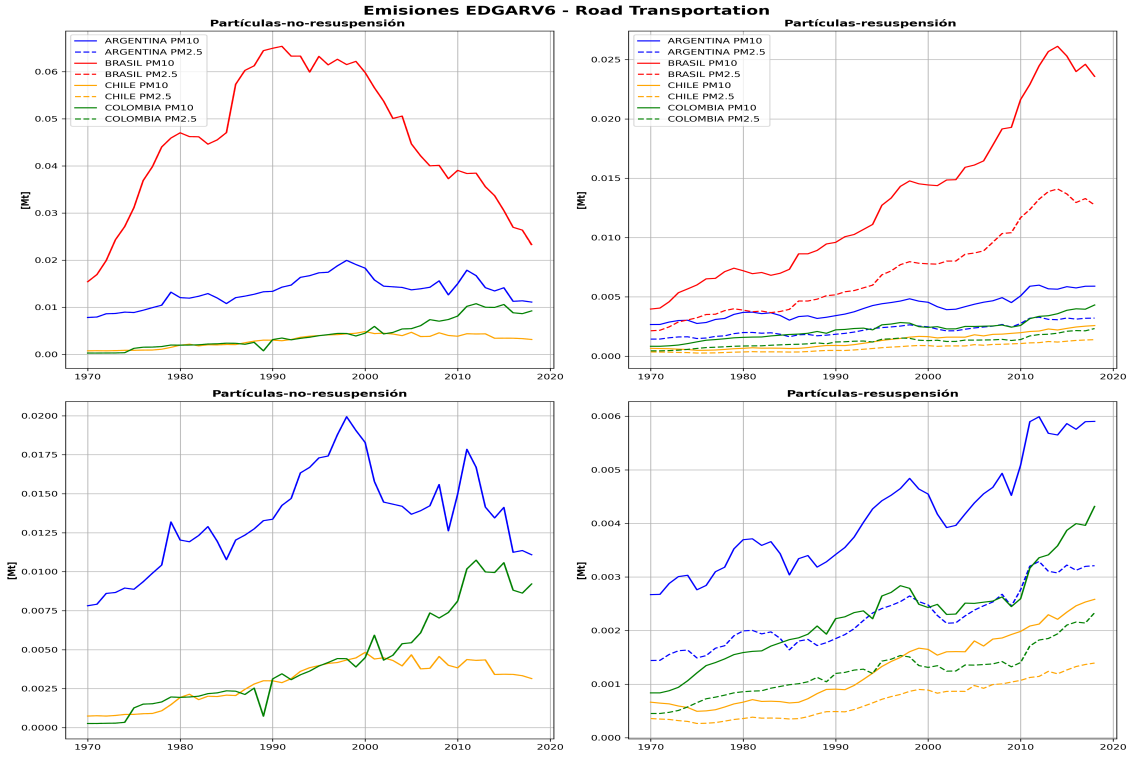


Figura 3.6: Emisiones de PM10 y PM2.5 para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2018, EDGARv6 [7].

EDGAR V7

Cuenta con datos de la región desde el año 1970 hasta 2021. En la figura 3.7 se muestran las emisiones de CO2 para el sector transporte por carretera en Chile, Argentina, Brasil y Colombia. En esta versión no se tienen datos de PM10, PM2.5, BC y NOx para los cuatro países.

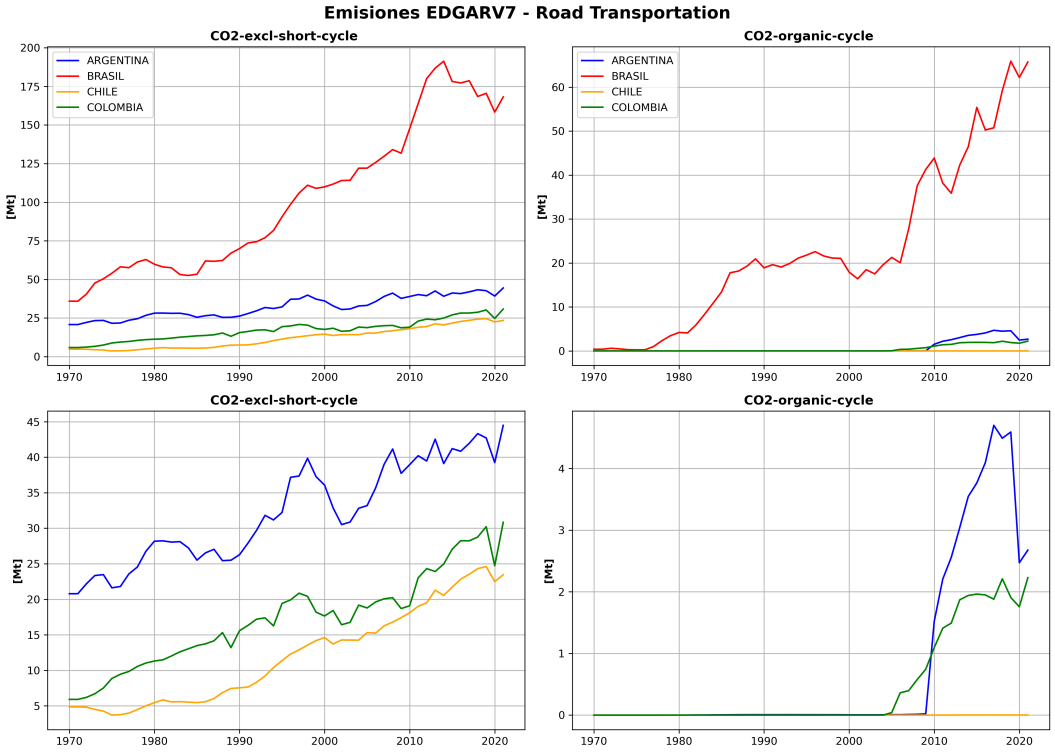


Figura 3.7: Emisiones de CO2 en el sector transporte por carretera en Chile,Colombia,Argentina y Brasil, año 1970 a 2021, EDGARv7 [6].

3.1.2. Sistema comunitario de datos de emisiones (CEDS)

Para América del Sur el inventario CEDS recopila datos sobre emisiones de gases de efecto invernadero, gases reactivos y partículas como el carbono negro y el carbono orgánico. En esta versión no se tienen datos de PM10 y PM2.5 para los cuatro países estudiados. En la siguiente figura se muestran las emisiones de CO2,NOx y BC comprendidas entre el año 1950 hasta 2019.

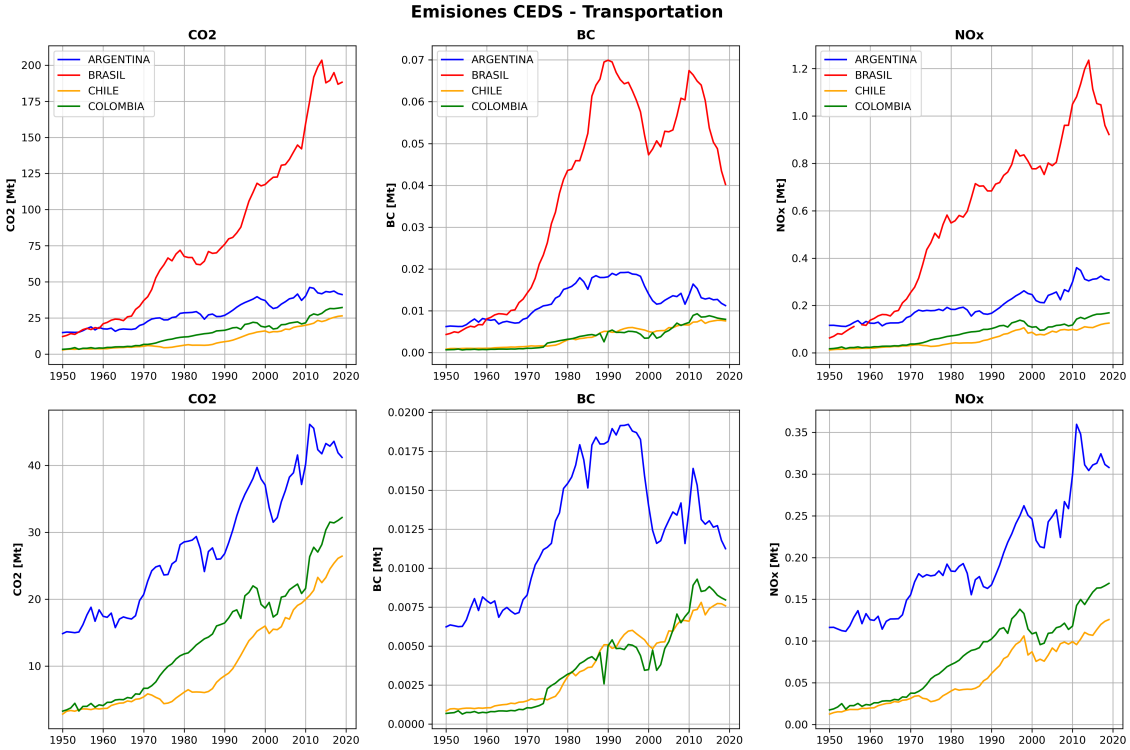


Figura 3.8: Emisiones de CO2, NOx yBC para el sector transporte por carretera, año 1950 a 2019, CEDS. [34] [27].

En este inventario solo se dispone de información del sector transporte en su totalidad, es decir, los datos no se encuentran desagregado en categorías como transporte por carretera y transporte terrestre fuera de carretera, además, las emisiones de carbono negro no están diferenciadas entre aquellas que incluyen resuspensión y las que no.

3.1.3. Servicio de vigilancia de la atmósfera de copernicus (CAMS)

Las versiones 5.3 y 6.2 de CAMS son las únicas que contienen datos de emisiones para países de América del Sur, estas versiones abarcan entre el año 2000 hasta el 2024. En este inventario no se tienen datos de PM10, PM2.5 para los cuatro países.

En las siguientes figuras se presentan las emisiones de CO2, BC y NOx del sector transporte por carretera en Chile, Brasil, Argentina y Colombia para ambas versiones.

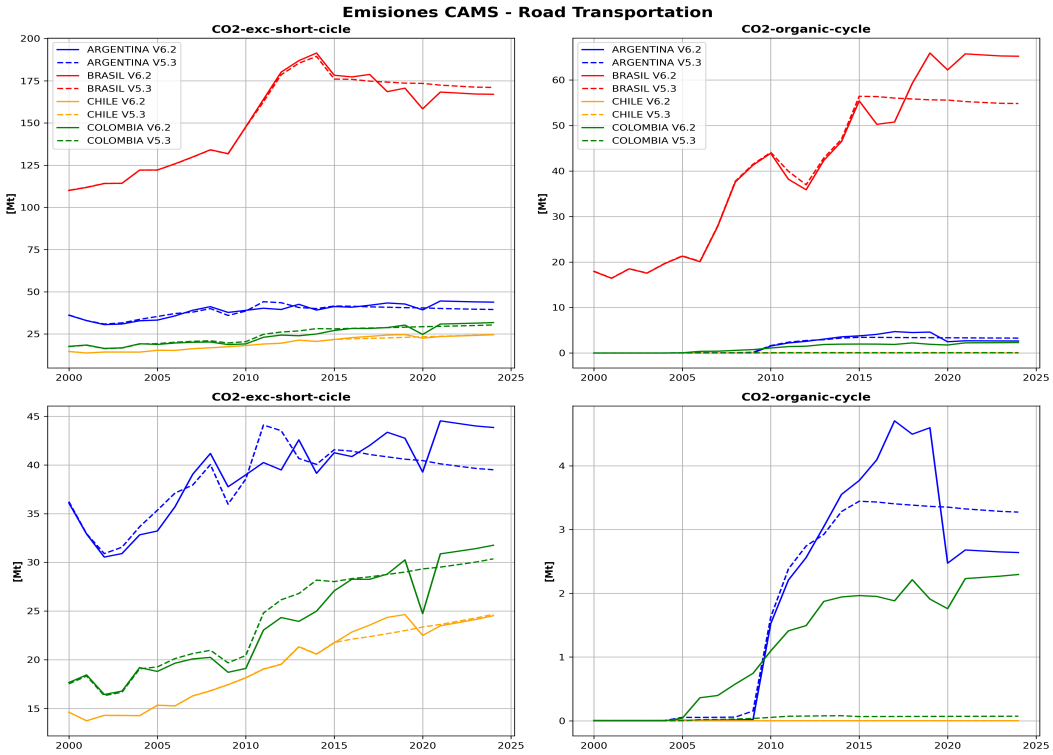


Figura 3.9: Emisiones de CO2 para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [36] [14].

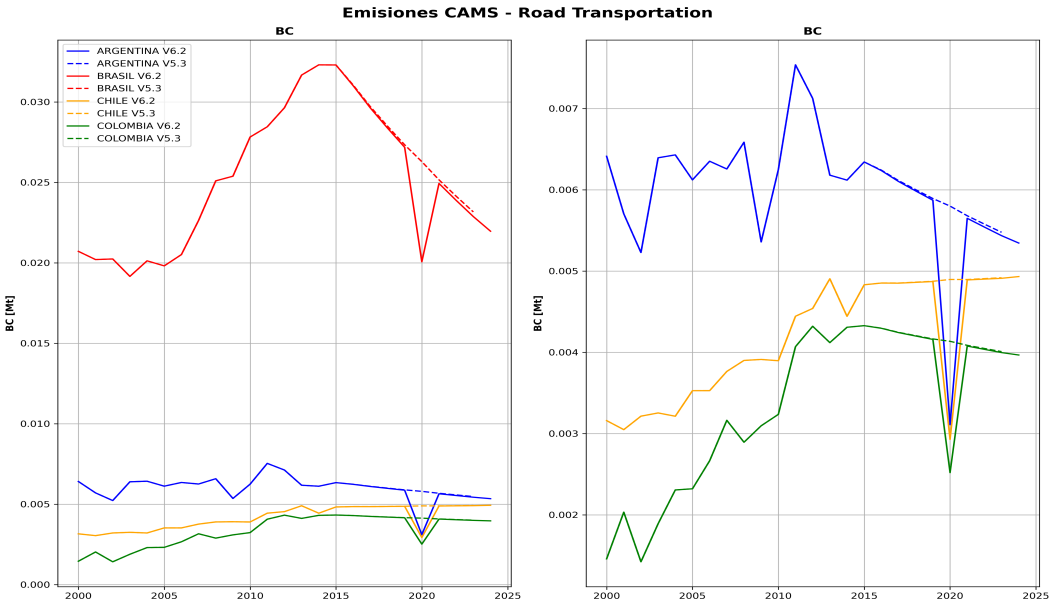


Figura 3.10: Emisiones de BC para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [36] [14].

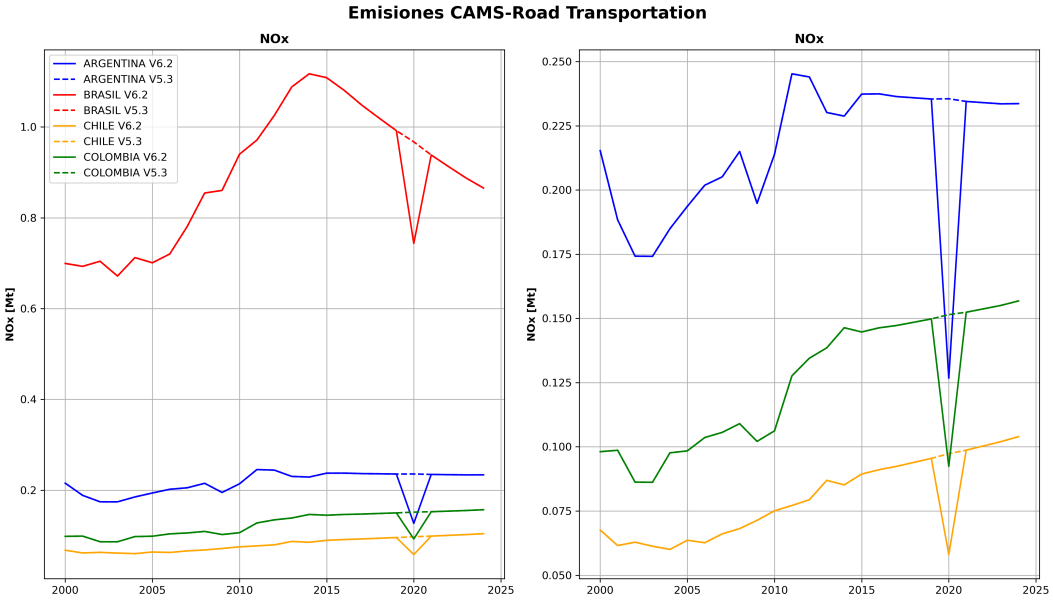


Figura 3.11: Emisiones de NOx para el sector transporte por carretera, año 1970 a 2024, CAMS V5.3 y V6.2 [36] [14].

3.1.4. Conclusiones

- EDGAR
    - EDGAR V4.3.2 tiene información únicamente para Chile y Argentina, además, los valores reportados presentan un orden de magnitud distinto en comparación con las versiones posteriores de EDGAR.
    - Aunque las cuatro versiones presentan curvas distintas, los valores de EDGAR V5, V6 y V7 están en un rango similar para cada contaminante, mientras que EDGAR V4.3.2 tiene valores en una escala más pequeña.
    - Las curvas de emisiones de BC en las distintas versiones son similares a las de PM10 y PM2.5, aunque sus valores son aproximadamente la mitad de los correspondientes al material particulado.
    - En todas las versiones, en el año 2009 se nota un aumento en las emisiones de CO2.
    - En EDGAR V5 y V7, las emisiones de CO2-org-cycle son consistentemente menores que las de CO2-exc-short-cycle en los cuatro países .
    - En EDGAR V5 y V6, los datos de PM10 y PM2.5 presentan variaciones cuando se trata de partículas en resuspensión, sin embargo, para el caso sin resuspensión, la diferencia en la quinta versión es mínima, mientras que en la versión seis los valores son idénticos.
    - Brasil registra las mayores emisiones de contaminantes al ambiente, seguido por Argentina, por otro lado Colombia y Chile presentan niveles más bajos, con tendencias similares entre ellos.
- CEDS
    - Para las emisiones de NOx, CO2 y BC, Brasil presenta las mayores emisiones, seguido por Argentina.
    - Las tendencias de emisiones para Chile y Colombia son similares.
    - Desde el año 2014, se muestra una tendencia a la baja en emisiones de NOx para los cuatro países.

- CAMS
    - Las curvas de emisiones de CO2, tanto de origen orgánico como excluyendo el ciclo corto del carbono, presentan una tendencia similar en las versiones CAMS V5.3 y V6.2.
    - Las curvas de CAMS V5.3 y V6.2 para BC y NOx siguen la misma tendencia, a excepción del año 2020, donde para V6.2 muestran una variación significativa, esta diferencia se atribuye a que la versión 5.3 no incorpora los efectos de la pandemia.
    - Para Brasil las emisiones de NOx disminuyen en el año 2014, lo contrario ocurre con Argentina, Chile y Colombia.

3.2. Comparación Inventarios pertenecientes a ECCAD

En la siguiente figura se presentan las emisiones de CO2, NOx, PM10, PM2.5 y BC para América del Sur. Es importante señalar que para realizar una comparación coherente, se agruparon los datos de CO2 reportados por CEDS con los de CO2-excl-short-cycle, ya que las versiones de EDGAR y CAMS entregan esta información por separado, lo mismo ocurre con las emisiones de BC y NOx, pues CEDS y CAMS no distinguen entre emisiones con y sin resuspensión, pero EDGAR la reporta de manera diferenciada.

Por otro lado, también es importante destacar que solo se muestra la curva de CAMS V6.2, esto debido a que la versión 5.3 presenta la misma tendencia, pero en una menor serie de tiempo, solo diferenciándose en el año 2020. Los datos de la gráfica abarcan desde 1950 hasta 2024.

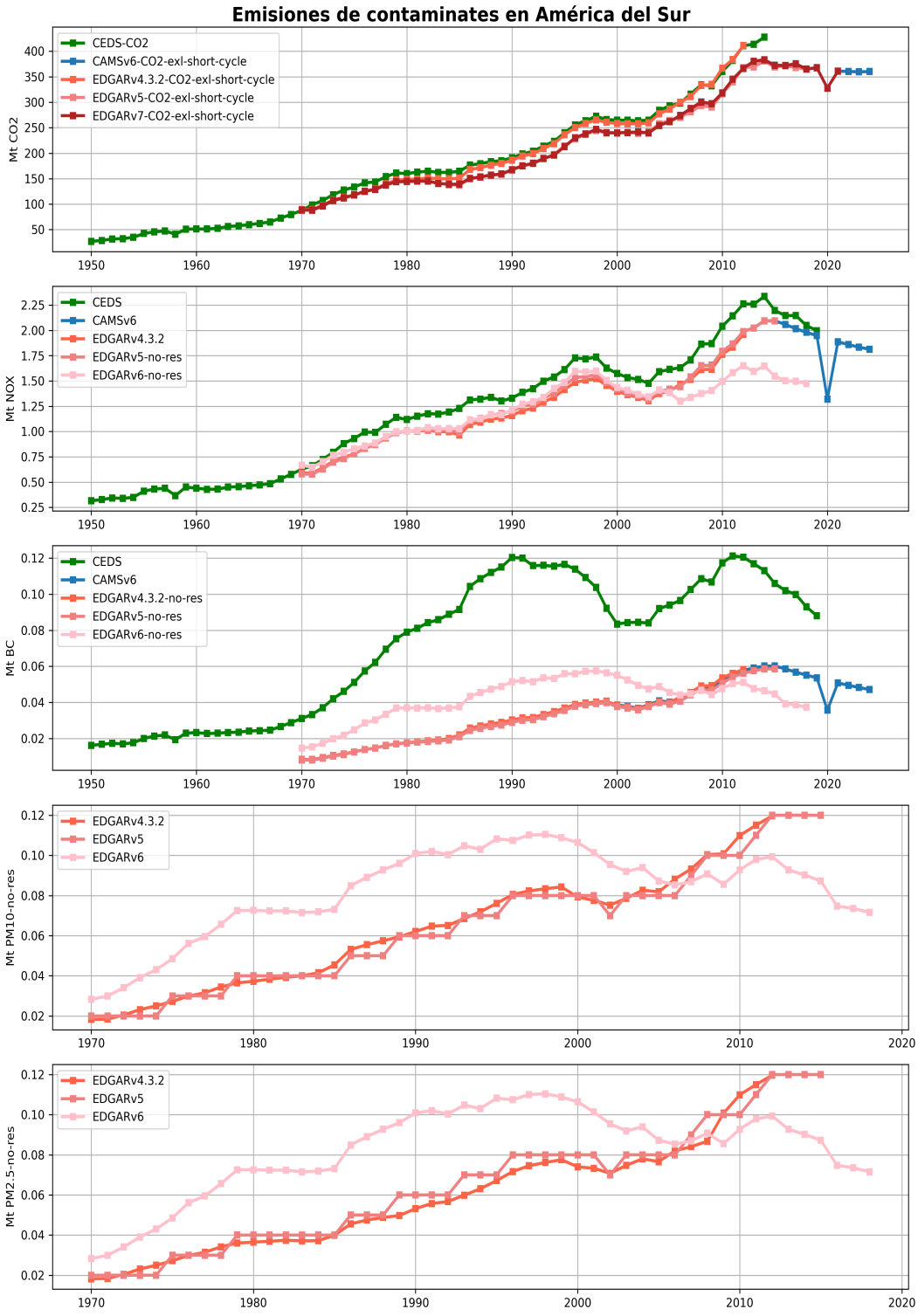


Figura 3.12: Comparación emisiones en sector transporte en América del Sur, EDGARD (V4.3.2, V5, V6, V7), CEDS, CAMS V6.2.

3.2.1. Conclusiones

- La base de datos CEDS presenta los valores más altos para BC, NOx y CO2, esto se debe a que CEDS entrega el total de emisiones del sector transporte y no las separa en transporte por carretera y transporte terrestre fuera de carretera.
- Las curvas de EDGAR V5 y CAMS V6.2 siguen la misma tendencia, aunque la base de datos de CAMS se extiende hasta un periodo de tiempo más amplio, abarcando hasta el año 2024.

3.3. Agencia internacional de energía (IEA)

La agencia internacional de energía recopila y publica estadísticas detalladas sobre emisiones a nivel global, sin embargo, su cobertura para América del Sur es limitada, ya que solo proporciona datos para Chile, Brasil, Argentina y Colombia y exclusivamente para emisiones de CO2. A pesar de estas limitaciones, su análisis es primordial, ya que los datos de la IEA no forman parte del catálogo ECCAD, lo que permite utilizarlos como referencia para comparar inventarios de emisiones tanto globales como locales.

En la figura 3.13 se muestran las emisiones de CO2 entregadas por este inventario, los datos abarcan desde el año 1990 hasta el 2022.

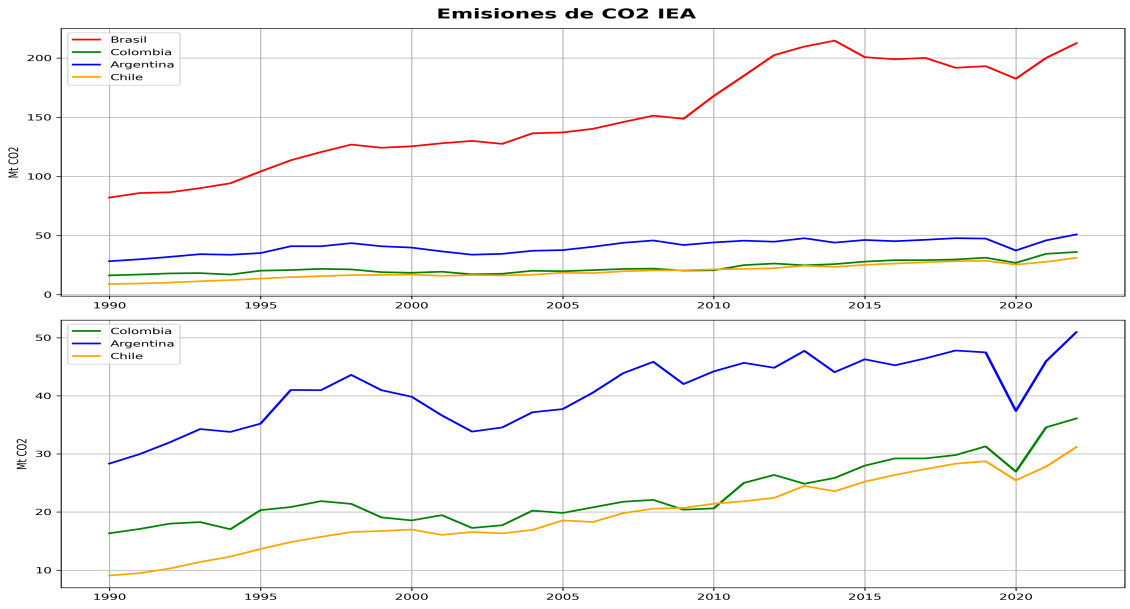


Figura 3.13: Emisiones de CO2 para el sector transporte, año 1990 a 2022, IEA [20].

3.3.1. Conclusiones

- Brasil lidera en emisiones de CO2 en la región, superando ampliamente al resto de los países.
- Todos los países muestran una tendencia creciente en sus emisiones a lo largo del período evaluado, con una caída visible el año 2020, probablemente provocada por el impacto de la pandemia y las restricciones asociadas.
- La tendencia de emisiones entre Chile y Colombia es similar.
- Al excluir a Brasil, Argentina se destaca como el país con mayores niveles de emisiones.

Capítulo 4

Análisis de tendencias anuales de emisiones reportadas por países de América del Sur

En esta sección se presenta un análisis de las tendencias de emisiones reportadas por los inventarios disponibles para los países de Argentina, Brasil, Chile y Colombia. El capítulo se inicia con el estudio de los registros del sistema de información ambiental (SInIA) en Argentina, seguido por el análisis del sistema de estimaciones de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (SEEG) en Brasil. Para Chile se consideran los datos del inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) y de INEMA. Finalmente, se revisan las estimaciones desarrolladas en proyecto PAPILA para Colombia.

A partir de este análisis, se compararán las tendencias reportadas en los inventarios nacionales de Argentina (SInIA), Brasil (SEEG), Chile (INGEI e INEMA) y Colombia (PAPILA) con aquellas estimadas por fuentes internacionales como CAMS, EDGAR, CEDS e IEA.

4.1. Argentina

El sistema de información ambiental (SInIA) es la plataforma oficial del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Argentina, encargada de recopilar y difundir la información ambiental a nivel nacional. Con respecto al sector transporte, SInIA cuenta con las estimaciones anuales de emisiones de dióxido de carbono [24].

La metodología que utiliza SInIA se basa en las guías del IPCC (2006), el cual es un organismo científico de las Naciones Unidas encargado de evaluar el conocimiento sobre el cambio climático [17].

En la siguiente figura se muestra la evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Argentina entre 1990 y 2022, según los datos reportados por el inventario nacional SInIA. La curva refleja las emisiones anuales en mega toneladas. Este gráfico constituye una referencia clave para contrastar las estimaciones locales con las de fuentes internacionales.

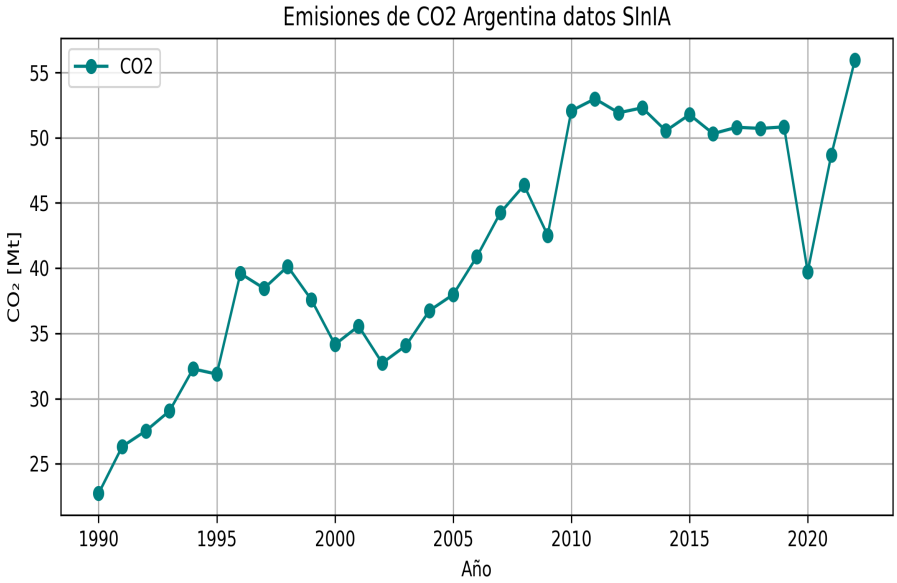


Figura 4.1: Emisiones de CO2 en Argentina según inventario nacional SInIA (1990–2020) [24].

4.1.1. Conclusiones

- Los datos de SInIA solo permiten observar la evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Argentina entre 1990 y 2022.

- En la serie de tiempo se nota que al comienzo de las décadas de 1990 y 2000 las emisiones de CO2 presentan un aumento en el tiempo, mientras que en la década del 2010 las emisiones se mantienen constantes. Por otro lado, en el año 2020 estas bajan notoriamente debido a los efectos de la pandemia, aunque en los años 2021 y 2022 se registra una rápida recuperación.

4.2. Brasil

El sistema de estimaciones de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (SEEG) proporciona estimaciones anuales de las emisiones de gases de efecto invernadero en Brasil. En el sector transporte cuenta con información de NOx y CO2 a nivel país y regional [11].

Las estimaciones del SEEG se fundamentan en el inventario brasileño de emisiones y absorciones antropogénicas de gases de efecto invernadero, desarrollado por el ministerio de ciencia, tecnología e innovación. Esta metodología fue publicada en 2018 en la revista Scientific Data, perteneciente al grupo Nature, lo que respalda transparencia y reproducibilidad a nivel internacional [33].

La figura 4.2 presenta una comparación visual de las emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno en Brasil entre el año 1990 y 2023. Por otro lado, la figura 4.3 muestra la evolución de las emisiones utilizando como referencia el año base 1990 (índice 1). A través de esta representación estandarizada se puede observar el comportamiento dinámico de ambos gases a lo largo del tiempo.

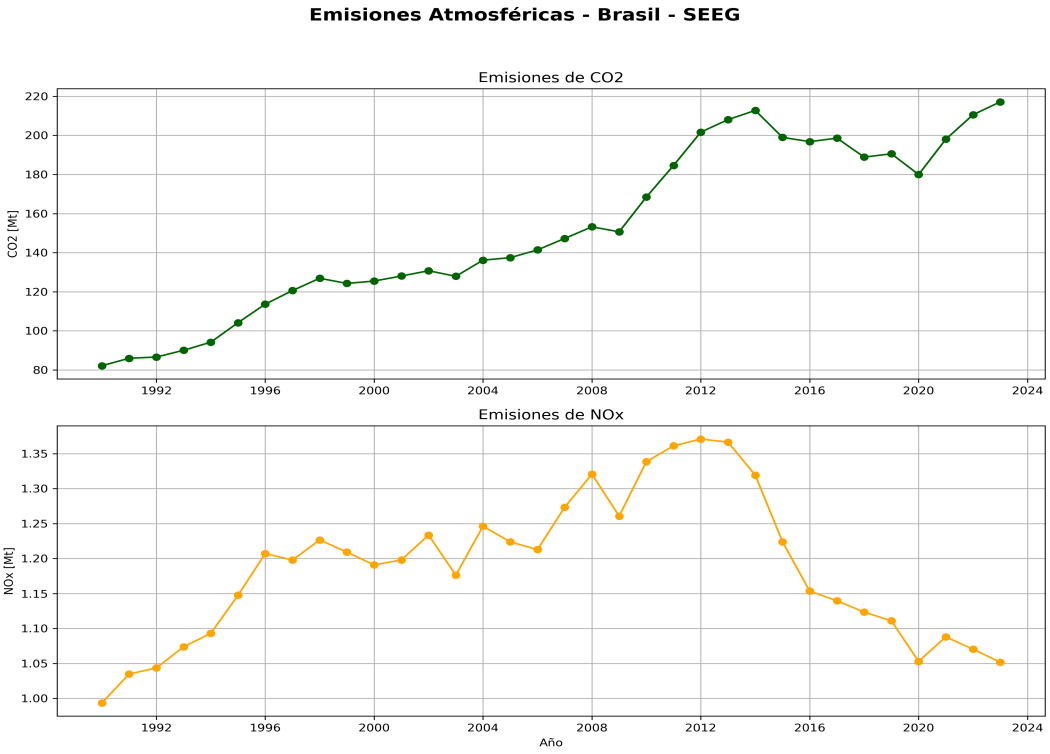


Figura 4.2: Análisis comparativo de las tendencias de CO2 y NOx según datos del SEEG (1990-2023) [11].

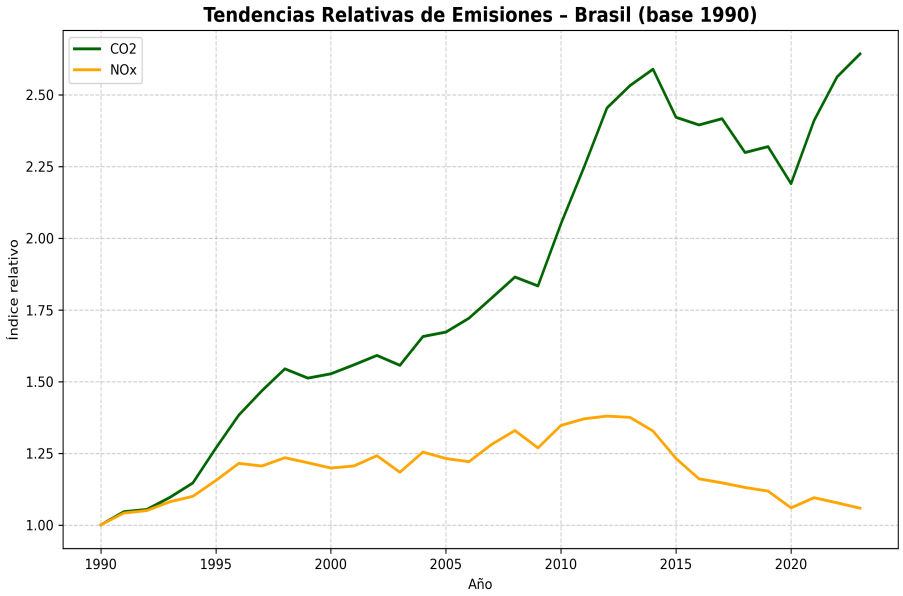


Figura 4.3: Tendencias relativas de emisiones de GEI en Brasil (1990–2023) [11].

4.2.1. Conclusiones

- En la serie de tiempo se nota que las emisiones de CO2 presentan un crecimiento sostenido desde la década de 1990, con un claro aumento a partir del año 2009 el cual se mantiene hasta el año 2014.
- Las emisiones de NOx alcanzaron su máximo valor entre los años 2010 y 2013, pero posteriormente han disminuido de manera continua.

4.3. Chile

Para el análisis en Chile se utilizan dos fuentes oficiales de información, el inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) y el inventario nacional de emisiones antropogénicas (INEMA).

4.3.1. Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile (INGEI)

El INGEI es el principal instrumento técnico del estado chileno para cuantificar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico en el país [26]. Este se basa en las directrices del IPCC de 2006, adaptadas a las condiciones nacionales. En el sector transporte, solo se reporta información sobre dióxido de carbono.

La siguiente figura presenta una comparación visual de las emisiones de dióxido de carbono entre el año 1990 y 2022, basada en estimaciones del INGEI.

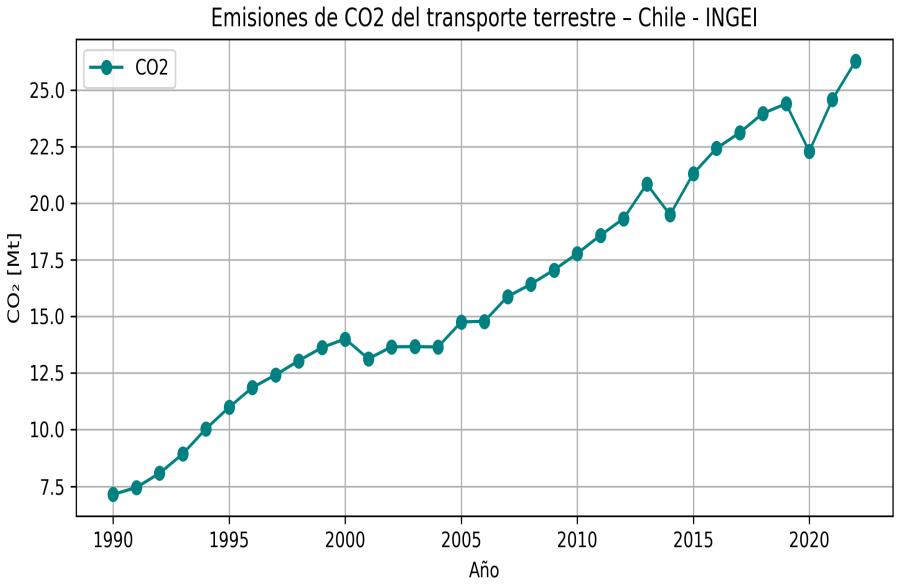


Figura 4.4: Emisiones de CO2 en Chile según INGEI (1990–2022) [26].

4.3.2. Inventario nacional de emisiones antropogénicas de Chile (INEMA)

INEMA es un inventario de alta resolución de emisiones atmosféricas generadas por actividades humanas en Chile, su metodología se fundamenta en un enfoque de tipo bottom-up, utilizando datos de actividad específicos por sector y año, desagregados a nivel regional y comunal. Para el sector transporte, se consideran registros de flota vehicular, distancias recorridas, estándares tecnológicos y consumo de combustibles [37]. La segunda versión de INEMA cuenta con información de dióxido de carbono, oxido de nitrógeno, carbono negro y material particulado fino.

La siguiente figura muestra las emisiones anuales de CO2 en Chile, basadas en INEMA 2. Los datos abarcan desde el año 1990 hasta 2023.

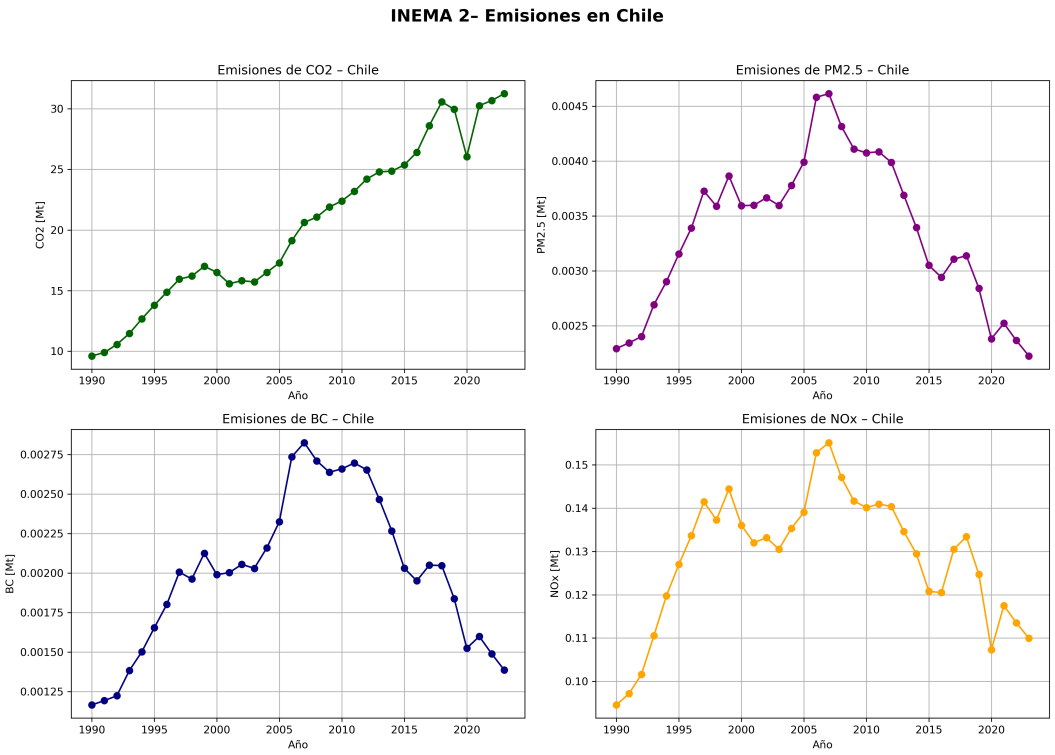


Figura 4.5: Comparación temporal de CO2, PM2.5, BC y NOx según INEMA 2 (1990-2023).

La figura 4.6 ilustra la evolución relativa de las emisiones de dióxido de carbono, material particulado fino, carbono negro y óxidos de nitrógeno en Chile durante el período de 1990 a 2023, se utiliza como año base 1990.

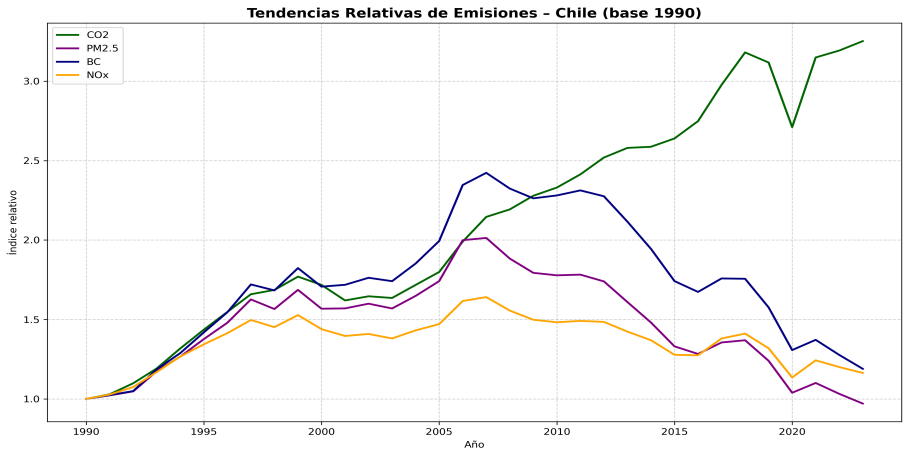


Figura 4.6: Comparación estandarizada de CO2, PM2.5, BC y NOx datos INEMA (1990-2023)

4.3.3. Conclusiones

- La serie de tiempo de INGEI evidencia un crecimiento constante de las emisiones de CO2, con leves estancamientos y caídas puntuales, pero con una clara trayectoria ascendente en el largo plazo. Por otro lado, los datos del inventario INEMA presentan una tendencia similar a los de INGEI pero con valores de emisiones más altos.

- Los datos de INEMA muestran que las emisiones de PM2.5 y BC aumentaron hasta el año 2007, para luego descender gradualmente. Aun así, se nota que las emisiones de carbono negro son menores que las de material particulado.

- Las emisiones de NOx muestran un crecimiento hasta el año 2007, seguido de una disminución progresiva que se extendió hasta el año 2016. Durante 2017 y 2018 se observó un repunte en los niveles, aunque en los años posteriores las emisiones retomaron su tendencia descendente.

4.4. Colombia

El proyecto PAPILA (predicción de la contaminación del aire en américa latina y el caribe) aplicado al sector transporte en Colombia emplea una metodología top-down adaptada a las condiciones locales. Las emisiones se calculan por categoría vehicular, tipo de combustible y estándar de emisión, se utilizan factores del modelo COPERT 5.5, luego se realiza una desagregación espacial considerando infraestructura vial, densidad poblacional y uso del suelo [31].

La figura 4.7 muestra las emisiones anuales de CO2, PM2.5, BC y NOx reportadas por PAPILA. Los datos abarcan desde el año 1990 hasta 2020. Mientras que la figura 4.8 muestra la evolución de diversas emisiones asociadas al transporte terrestre , normalizadas respecto al año base 1990.

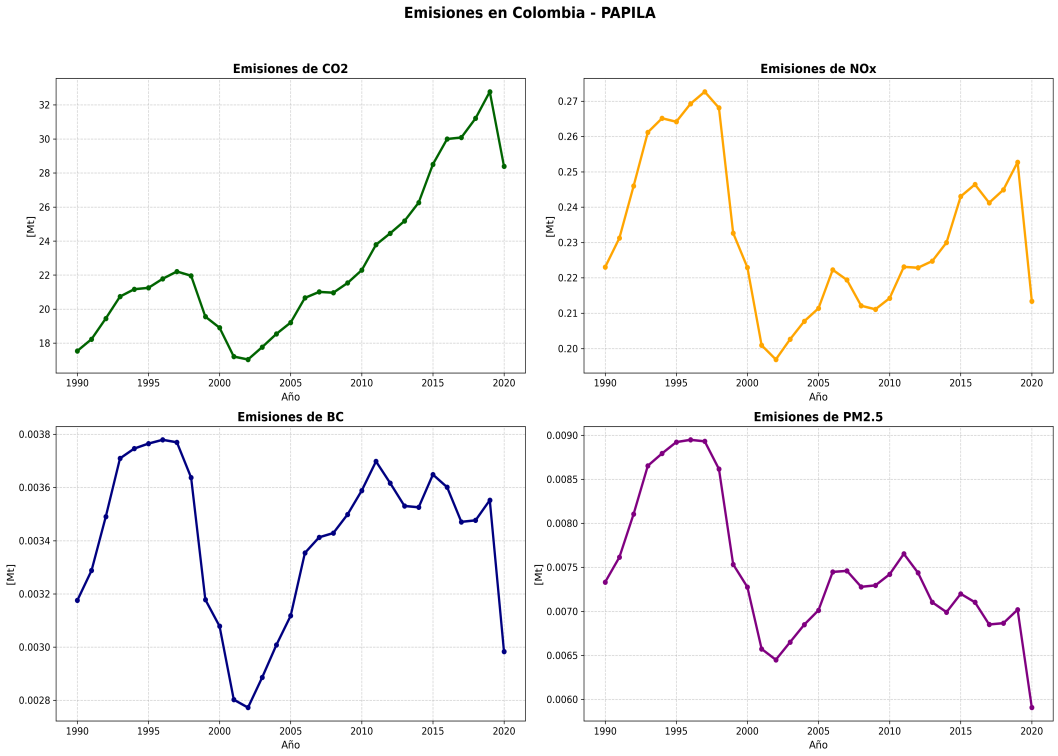


Figura 4.7: Comparación emisiones de CO2, PM2.5, BC y NOx datos PAPILA (1990-2020) [31]

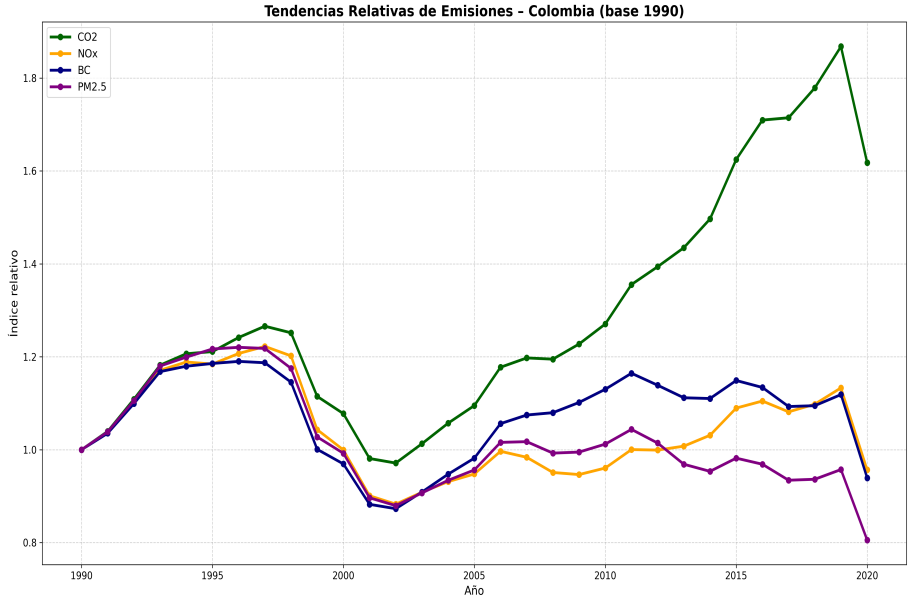


Figura 4.8: Comparación estandarizada de CO2, PM2.5, BC y NOx datos PAPILA (1990-2020) [31].

4.4.1. Conclusiones

- La serie de tiempo de PAPILA muestra una tendencia ascendente de emisiones de CO2, con un crecimiento hasta el año 2019.
- Con respecto a las emisiones de BC y PM2.5, en los gráficos se nota que existe un máximo temprano en el año 1996 seguido por una caída y fluctuaciones posteriores.
- Entre 1990 y 1997 las emisiones de NOx muestran un aumento, luego hasta el año 2002 se muestra una caída significativa posiblemente debido a normativas ambientales, desde el 2003 las emisiones han aumentado con alta variabilidad.

Capítulo 5

Análisis comparativo de emisiones reportadas por inventarios internacionales y locales en países de América del sur

El análisis de emisiones atmosféricas requiere el uso de inventarios que recopilan y estiman datos provenientes de distintas fuentes y metodologías, en este apartado se realiza una comparación entre los inventarios disponibles en el catálogo ECCAD (EDGAR, CEDS y CAMS) , el inventario de la agencia internacional de energía (IEA) y las bases de datos disponible en Argentina, Brasil, Chile y Colombia.

Es importante señalar que los datos de emisiones de CO2 reportados por CEDS, IEA y los inventarios locales fueron agrupados junto con los registros de CO2-excl-short-cycle entregados por EDGAR (V5-V7) y CAMS (V5.3-V6.2). Del mismo modo, en el caso de las emisiones de BC y NOx, se agruparon los valores correspondientes a los contaminantes sin resuspensión de EDGAR (V4.3.2-V5-V6) con aquellos provenientes de las otras fuentes.

5.1. Argentina

En la siguiente figura se presentan las emisiones de CO2 correspondientes a Argentina, con datos que abarcan entre el año 1970 hasta 2024, además se incluye una gráfica desde el año 1990. Cabe mencionar que los datos de EDGAR V4.3.2 fueron multiplicados por un factor de 10.000 para facilitar su representación gráfica y asegurar una comparación visual adecuada.

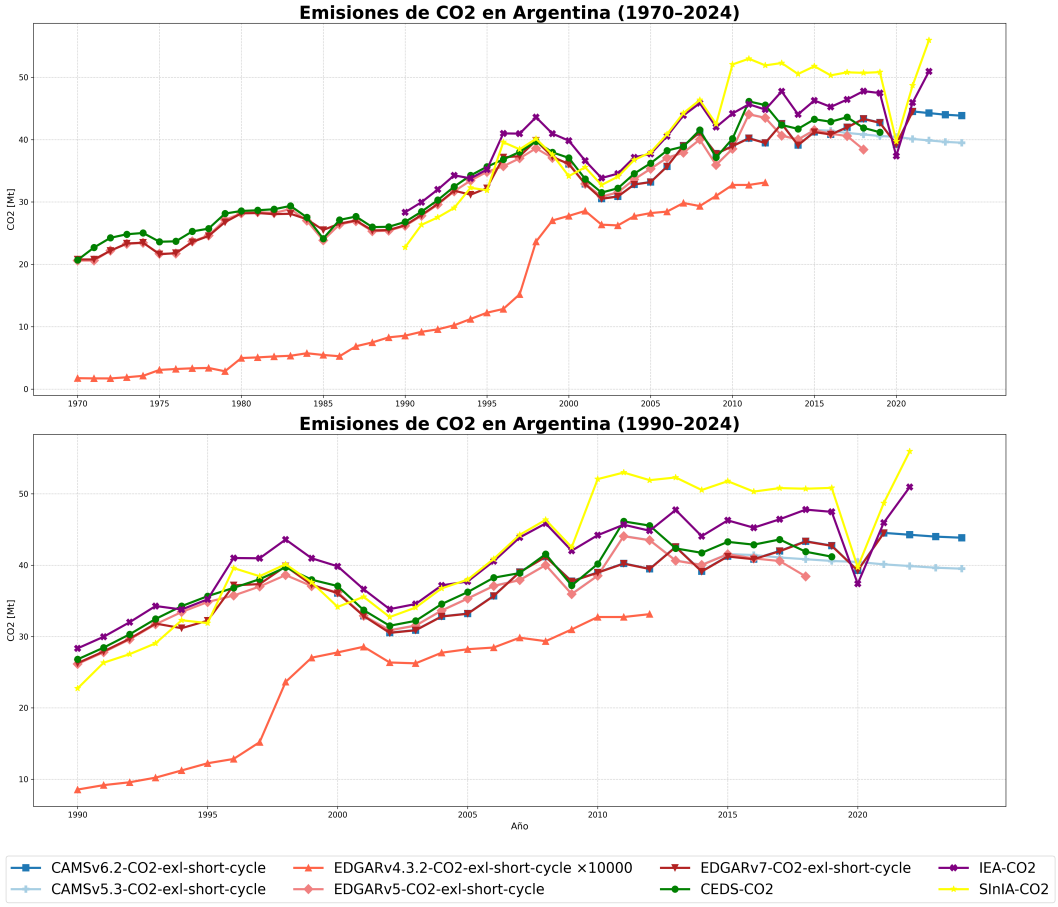


Figura 5.1: Evolución de emisiones de CO2 en Argentina 1970–2024 y detalle desde 1990, EDGARD (V4.3.2, V5, V7), CEDS, CAMS (V5.3 ,V6.2), IEA y SInIA.

La figura 5.2 muestra la evolución de las emisiones de CO2 del ciclo orgánico en Argentina entre los años 2000 a 2024, se presentan estimaciones provenientes de distintas fuentes internacionales, incluyendo CAMS (V5.3-V6.2) y EDGAR (V5-V7). Para las emisiones de ciclo orgánico no se encontró datos en inventarios locales.

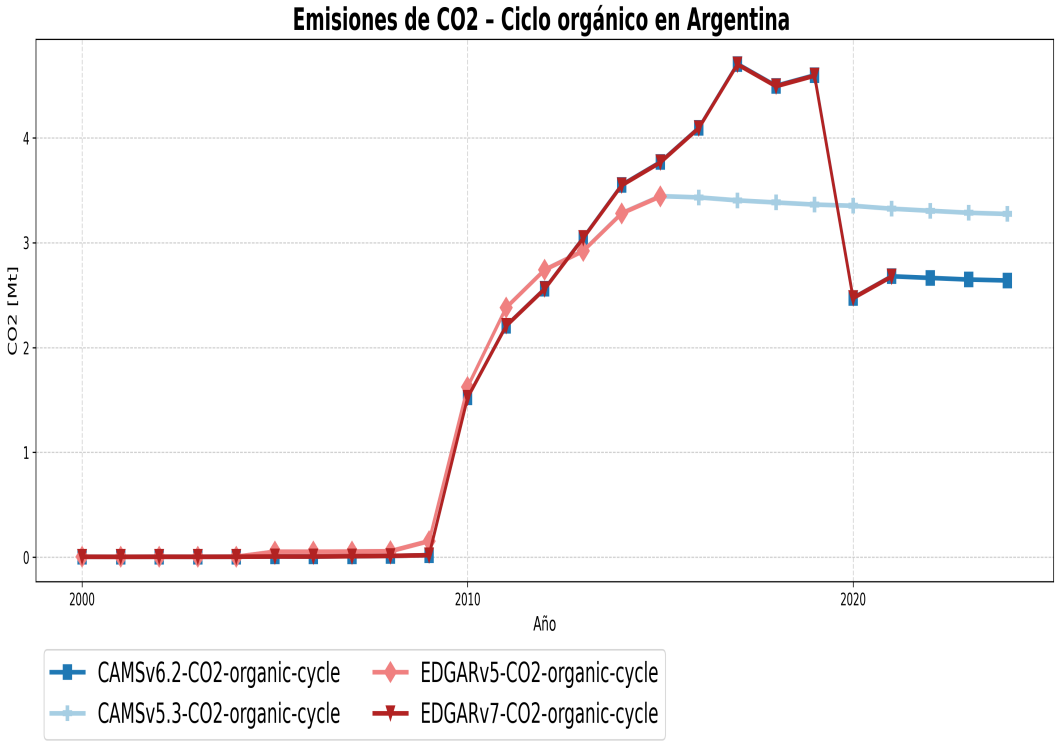


Figura 5.2: Evolución de emisiones de CO2 organico en Argentina 1970–2024, EDGARD (V5, V7), CEDS, CAMS (V5.3 ,V6.2)

La Figura 5.3 ilustra las emisiones de óxidos de nitrógeno en Argentina desde 1970 hasta 2024, incluyendo una gráfica complementaria que detalla el periodo 1990–2024. Se presentan estimaciones provenientes de diversos inventarios internacionales, tales como CEDS, CAMS y EDGAR diferenciando, cuando es aplicable, los datos sin resuspensión.

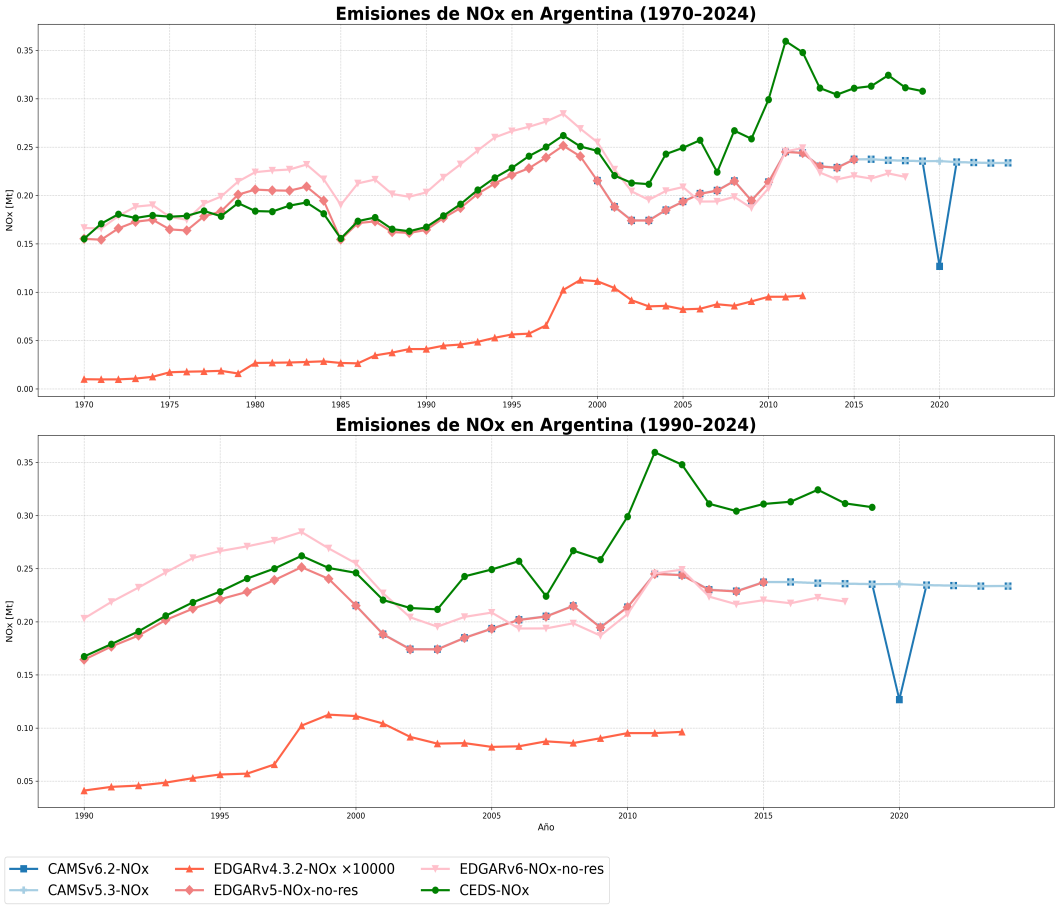


Figura 5.3: Evolución de emisiones de NOx en Argentina 1970–2024 y detalle desde 1990, EDGARD (V4.3.2, V5, V6, V7), CEDS y CAMS (V5.3 ,V6.2).

Las gráficas mostradas a continuación presentan las emisiones de PM10, PM2.5 y BC en Argentina entre el año 1970 y 2024, se incluyen datos de CEDS, CAMS y diversas versiones de EDGAR.

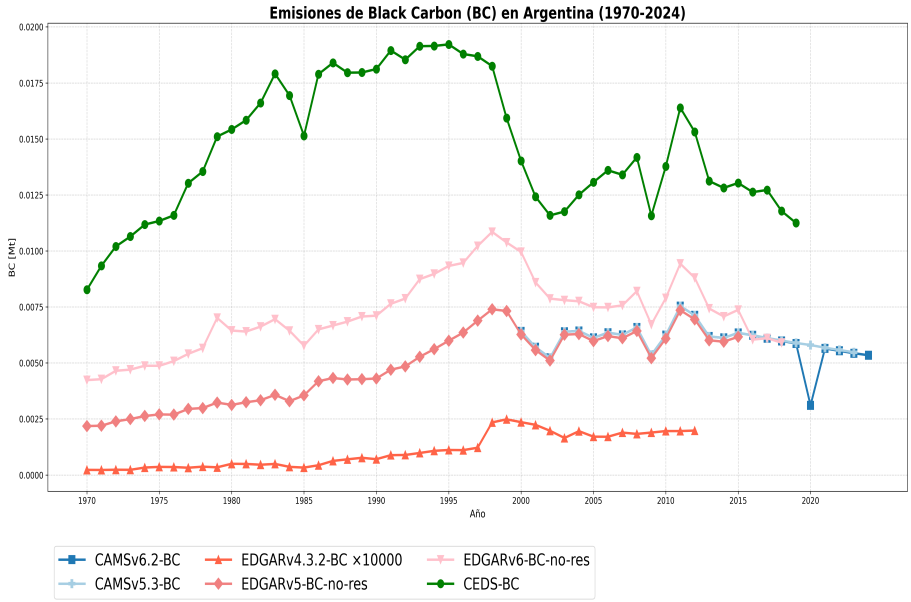


Figura 5.4: Evolución de emisiones de BC en Argentina 1970–2024, EDGARD (V4.3.2, V5, V6), CEDS, CAMS (V5.3 ,V6.2).

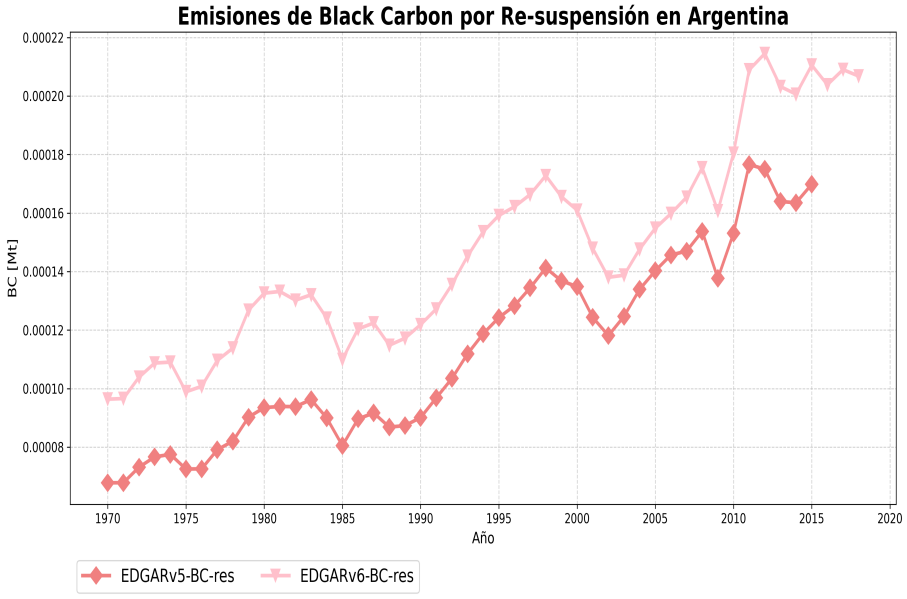


Figura 5.5: Evolución de emisiones de BC-resuspensión en Argentina 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

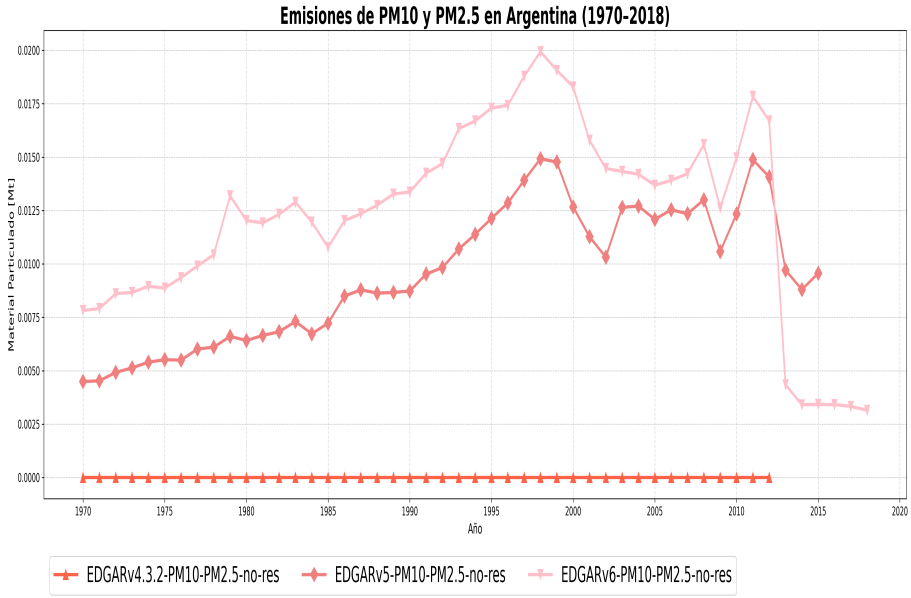


Figura 5.6: Evolución de emisiones de PM10-PM2.5 en Argentina 1970–2018, EDGARD (V4.3.2, V5, V6).

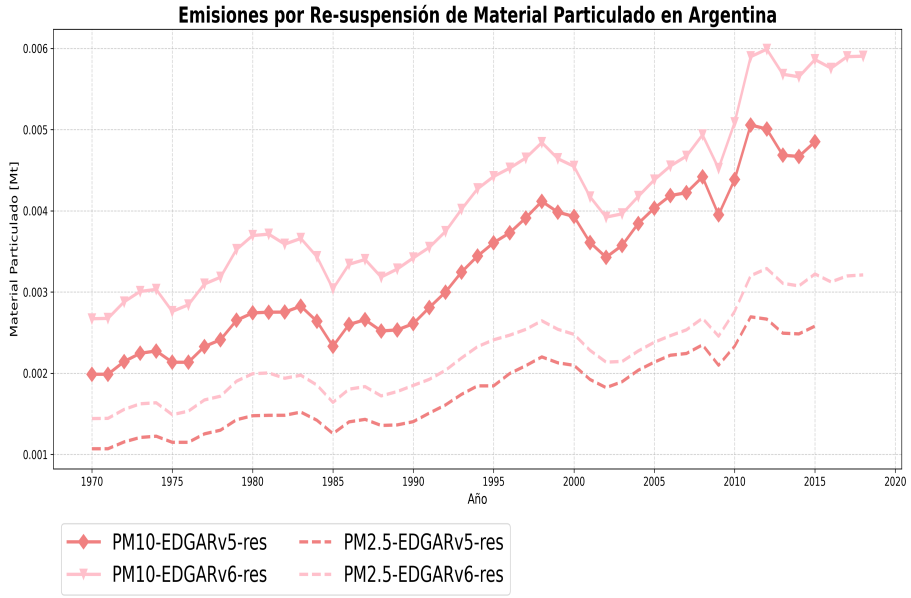


Figura 5.7: Evolución de emisiones de PM10-PM2.5-resuspensión en Argentina 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

5.1.1. Conclusiones

- Todas las bases de datos reflejan una tendencia creciente en las emisiones de CO2 a lo largo del tiempo, sin embargo, se observa una excepción en el año 2020, donde la mayoría de las series de tiempo muestran una disminución, la única fuente que no sigue esta tendencia en dicho año es CAMS V5.3.
- Hasta el año 2009, los datos de SInIA siguen una tendencia similar a los de los inventarios internacionales, especialmente a los de la IEA.
- Desde el año 2010, los datos de SInIA son mayores a los de los inventarios internacionales.
- Los datos de EDGAR V4.3.2 presentan magnitudes inferiores en comparación con las demás versiones, por lo que se multiplican por un factor de 10.000 con el objetivo de normalizar las escalas y permitir una evaluación comparativa entre series.
- Excluyendo EDGAR V4.3.2, los datos de CO2 se encuentran en una escala similar, siendo los de la IEA y SInIA los que presentan mayores valores de emisiones.
- Las emisiones de CO2 orgánico son iguales para las versiones de EDGAR V7 y CAMS V6.2, mientras que las de EDGAR V5 coinciden con las de CAMS V5.3.
- Para las emisiones de NOx, los datos de CAMS V6.3 y V5.3 son iguales a los de EDGAR V5, con excepción de los valores del año 2020.
- Las curvas de EDGAR, CEDS y CAMS muestran una tendencia creciente en las emisiones de BC desde 1970, especialmente en las versiones que incluyen resuspensión, no obstante, se observa una leve baja en los años 1998, 2008 y 2012.
- Las curvas evidencian que las versiones de EDGAR que incluyen resuspensión (V5 y V6) presentan valores significativamente menores en comparación con las gráficas sin resuspensión.
- En todas las versiones de EDGAR, los valores de PM10 y PM2.5 sin resuspensión son iguales.
- Para el material particulado con resuspensión, los valores de PM10 y PM2.5 son distintos, siendo EDGAR V6 la fuente que presenta las emisiones más altas.

5.2. Brasil

La figura presentada a continuación muestra la evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Brasil durante el periodo de 1970 hasta 2024, con respecto a distintas fuentes internacionales y nacionales. Se incluye un desglose específico desde el año 1990.

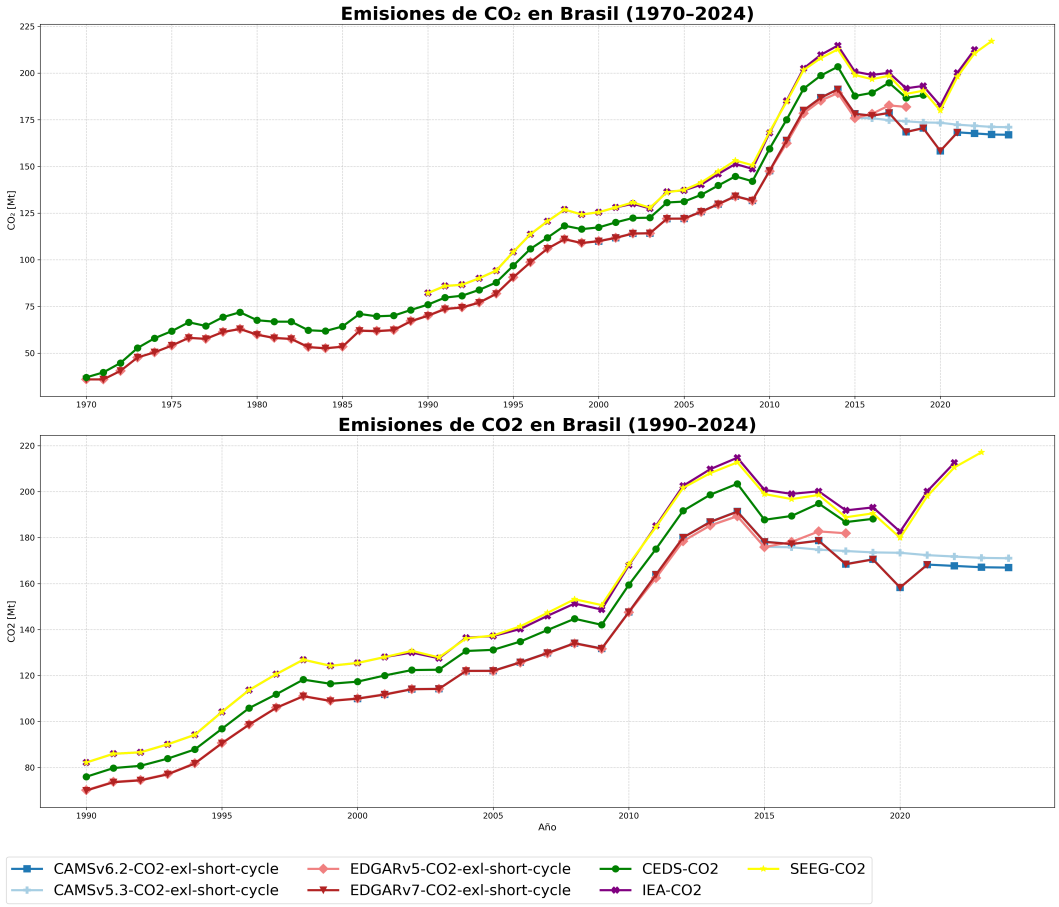


Figura 5.8: Evolución de emisiones de CO2 en Brasil, EDGAR (V5,V7), CEDS, CAMS (V5.3, V6.2), IEA, SEEG.

La figura 5.9 representa la evolución de las emisiones de dióxido de carbono atribuibles al ciclo orgánico en Brasil durante el periodo de 1970 a 2024. Se incluyen datos reportados por CAMS y EDGAR.

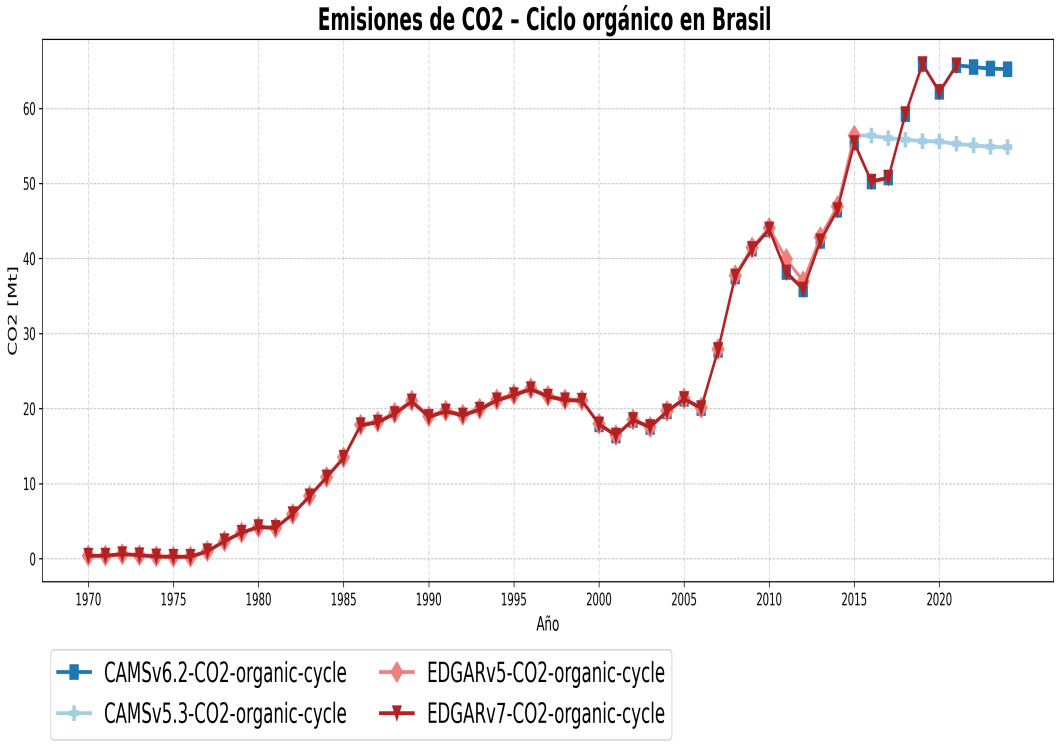


Figura 5.9: Emisiones de CO2 del ciclo orgánico en Brasil según inventarios internacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V6), CAMS (V5.3,V6.2).

La Figura 5.10 muestra las emisiones de NOx en Brasil, esta se divide en dos gráficos, el primero cubre el periodo completo (1970–2024) mientras que el segundo está enfocado en detalle desde el año 1990. Cabe destacar que los valores del SEEG son más altos que los estimados por los inventarios internacionales, por ende, se ha aplicado un factor de corrección de 1,5333, dividiendo los datos del SEEG por dicho valor, esta normalización se realiza para facilitar la evaluación gráfica y analítica.

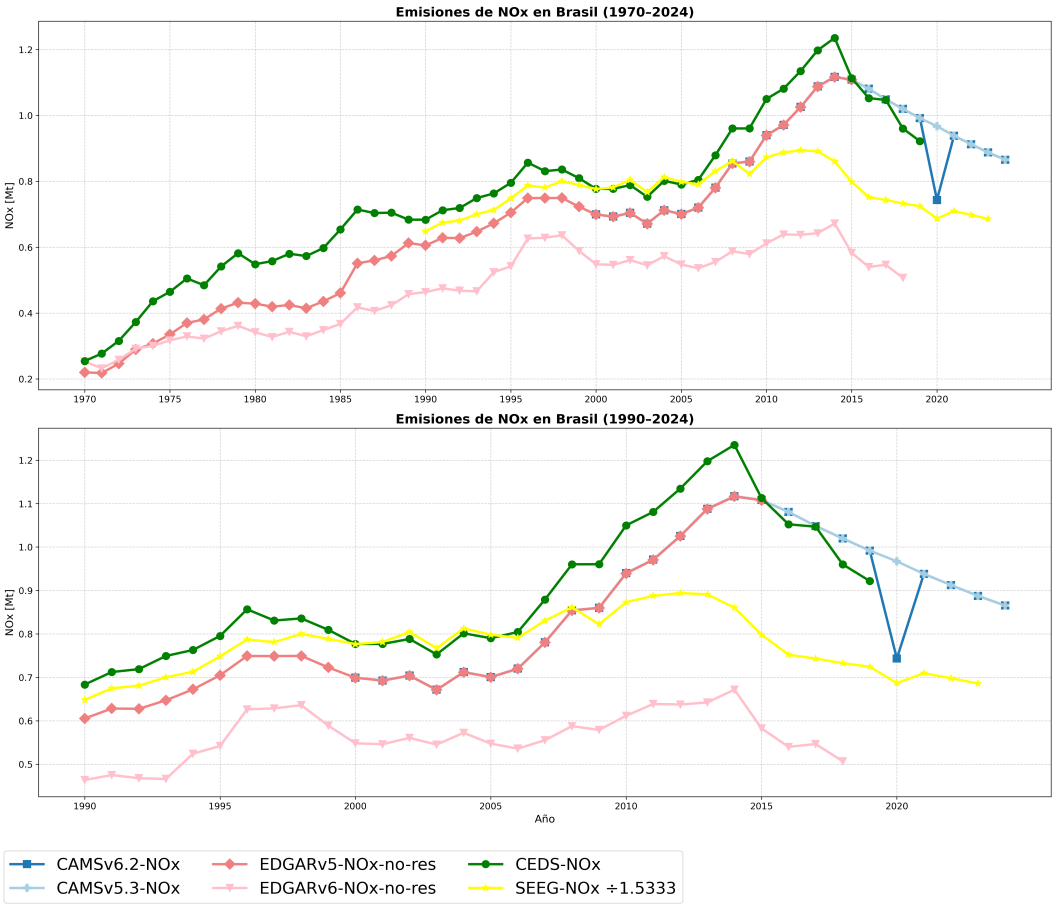


Figura 5.10: Evolución de emisiones de NOx en Brasil (1970-2024), EDGAR (V5,V6), CEDS, CAMS (V5.2, V6.2) y SEEG.

Las siguientes imágenes presentan las emisiones de PM10, PM2.5 y BC en Brasil para el periodo comprendido entre los años 1970 y 2024, se incluyen datos de CEDS, CAMS y EDGAR con diferenciación entre emisiones con y sin resuspensión.

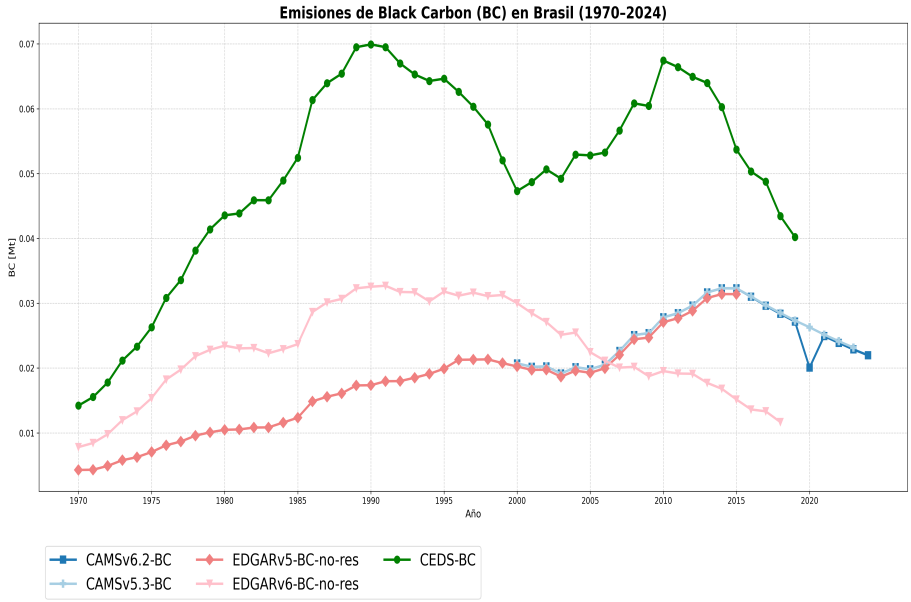


Figura 5.11: Evolución de emisiones de BC en Brasil 1970–2024, EDGARD (V4.3.2, V5, V6), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2).

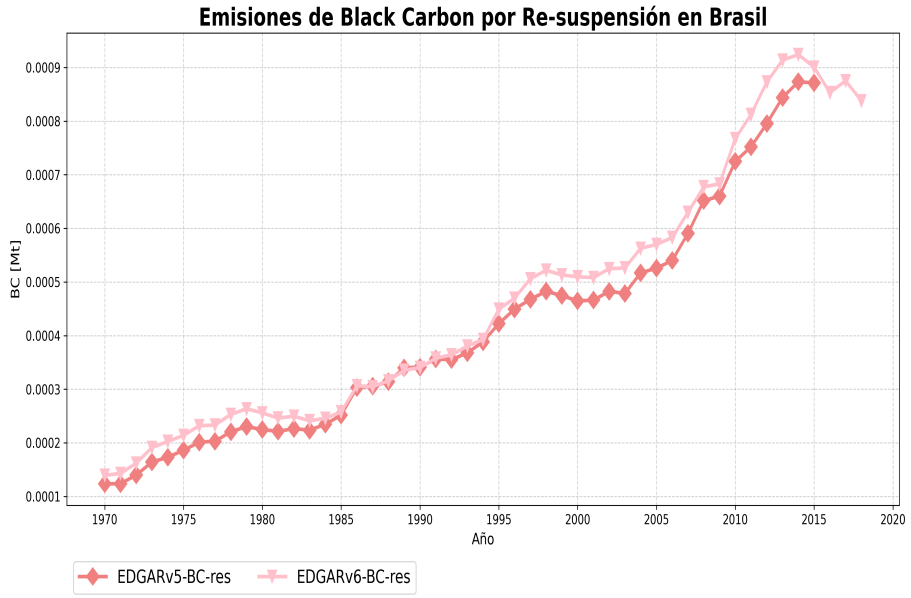


Figura 5.12: Evolución de emisiones de BC-resuspensión en Brasil 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

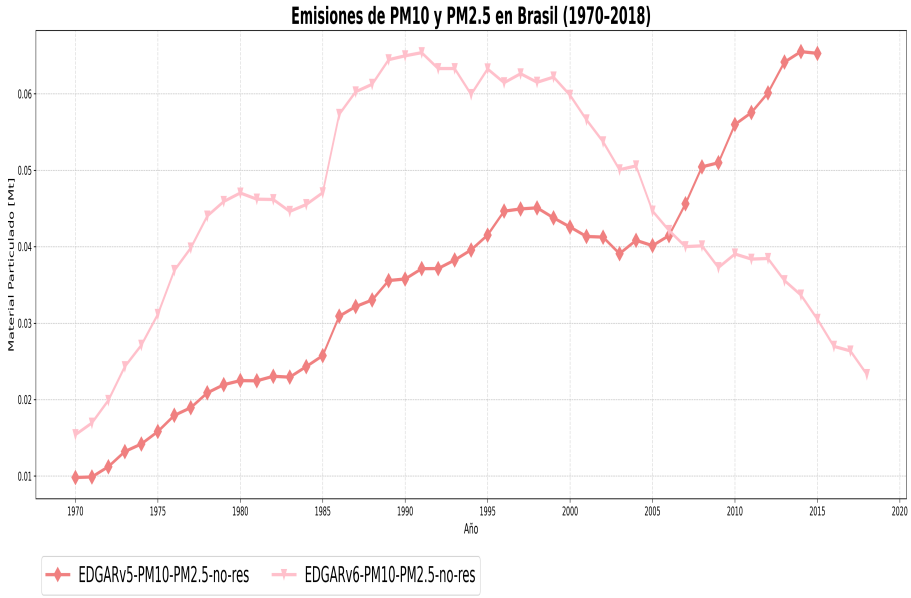


Figura 5.13: Evolución de emisiones de material particulado en Brasil 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

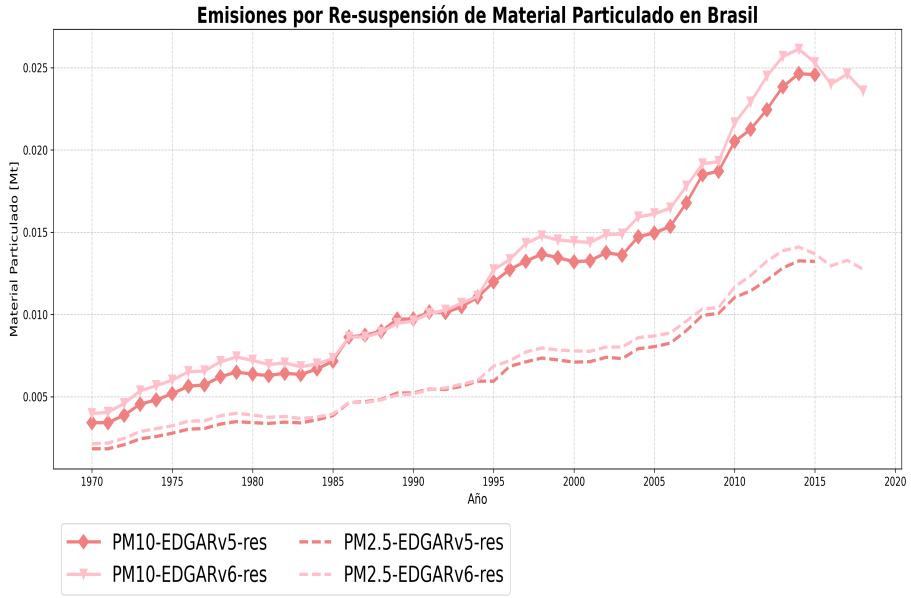


Figura 5.14: Evolución de emisiones de material particulado con resuspensión en Brasil 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

5.2.1. Conclusiones

- Las curvas de emisiones de CO2 muestran una tendencia ascendente desde el año 1970, alcanzando su punto más alto en 2014 y 2023.
- La inclusión de los datos provenientes del SEEG a partir del año 1990 permite contextualizar los datos internacionales con registros locales. En particular, se evidencia una mayor similitud entre las series del SEEG y las estimaciones reportadas por la IEA y CEDS.
- las series de tiempo de emisiones de CO2 de la IEA y SEEG presentan los valores más altos, además, estas bases de datos tienen la misma tendencia con mínimas diferencias en sus valores.
- En el caso de las emisiones de CO2, se nota que CAMS (V5.3 y V6.2) y EDGAR (V5 y V7) presentan la misma tendencia hasta el año 2016.
- Para el CO2-exc-short-cycle, CAMS V6.2 y EDGAR V7 presentan los mismos valores.
- Para las emisiones de CO2, los valores reportados por CEDS son más bajos que los estimados por la IEA y el SEEG, esta diferencia no ocurre en el caso del NOx.
- Respecto a las emisiones de CO2-org-cycle, las curvas de EDGAR y CAMS presentan la misma tendencia hasta el año 2015.
- Desde el año 2014 se muestra una tendencia a la baja en emisiones de NOx.
- Los valores reportados por SEEG son mayores que los inventarios internacionales para las emisiones de NOx, por esta razón se dividen por un factor de 1,5333.
- Las emisiones de BC son aproximadamente el 50 % de las de material particulado.
- Las curvas evidencian que las versiones de EDGAR que incluyen resuspensión (V5 y V6) presentan valores significativamente menores en comparación con las graficas sin resuspensión.
- En todas las versiones de EDGAR, los valores de PM10 y PM2.5 sin resuspensión son iguales.

- Para el material particulado con resuspensión, los valores de PM10 y PM2.5 son distintos, y EDGAR V6 presenta las emisiones más altas.

5.3. Chile

La siguiente figura muestra la evolución de las emisiones de CO2 en Chile desde el año 1970 hasta 2024. Se presentan dos gráficas, una que abarca el periodo completo y otra que detalla las emisiones a partir de 1990, año en que comienzan los registros del INGEI e INEMA. Se debe recalcar que la curva de EDGAR v4.3.2 ha sido multiplicada por un factor de 1.000, esto se realizó con el fin de facilitar la visualización conjunta.

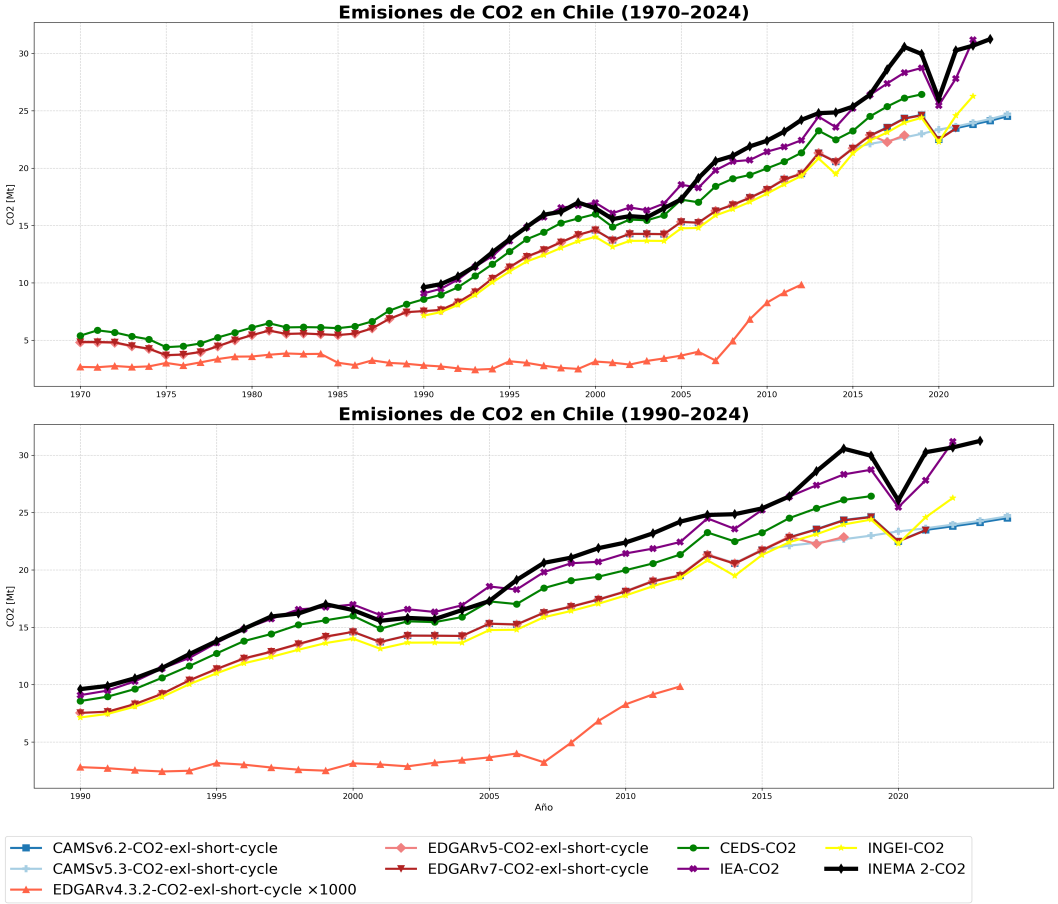


Figura 5.15: Emisiones de CO2 en Chile según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V4.3.2,V5,V7), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), IEA, INGEI, INEMA.

La figura 5.16 presenta la evolución de las emisiones de dióxido de carbono atribuibles al ciclo orgánico en Chile entre 2005 y 2024. Se incluyen estimaciones provenientes de distintos inventarios internacionales, entre ellos CAMS (V6.2 y V5.3) y EDGAR (V5 y V7),

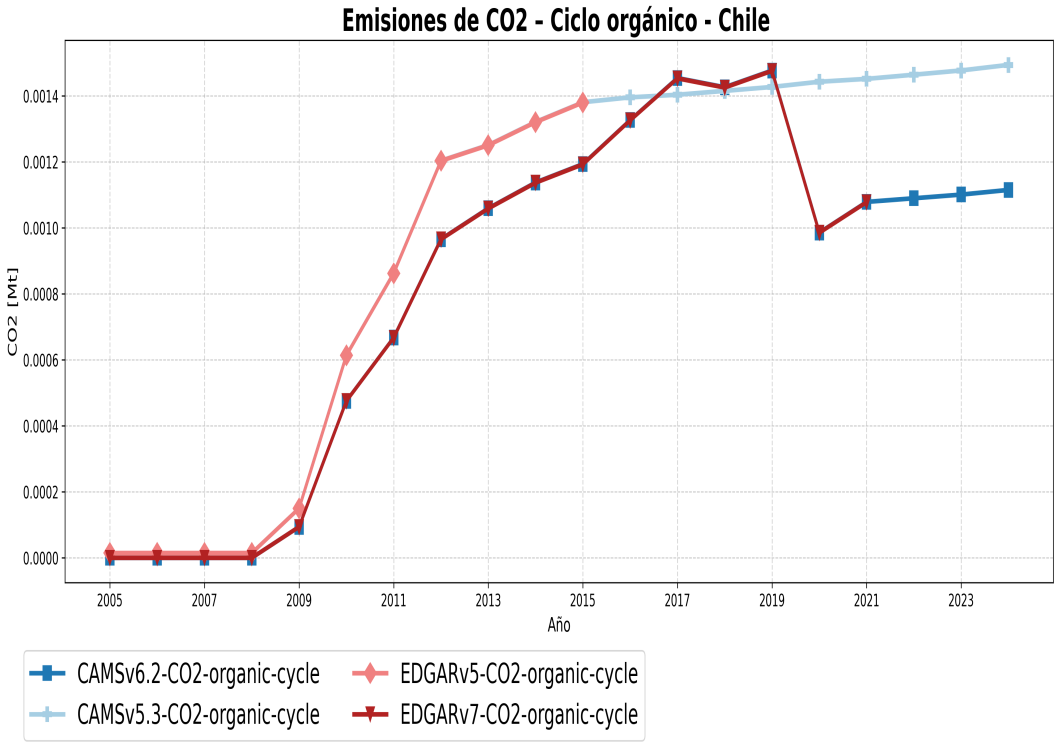


Figura 5.16: Emisiones de CO2–ciclo-orgánico en Chile según inventarios internacionales (2005–2024), EDGAR (V5,V7), CAMS (V5.3, V6.2).

La Figura 5.17 muestra las emisiones de NOx en Chile entre los años 1970 y 2024, se utilizan datos provenientes de fuentes internacionales y nacionales. Cabe destacar que los datos de INEMA han sido divididos por un factor de 1,5333.

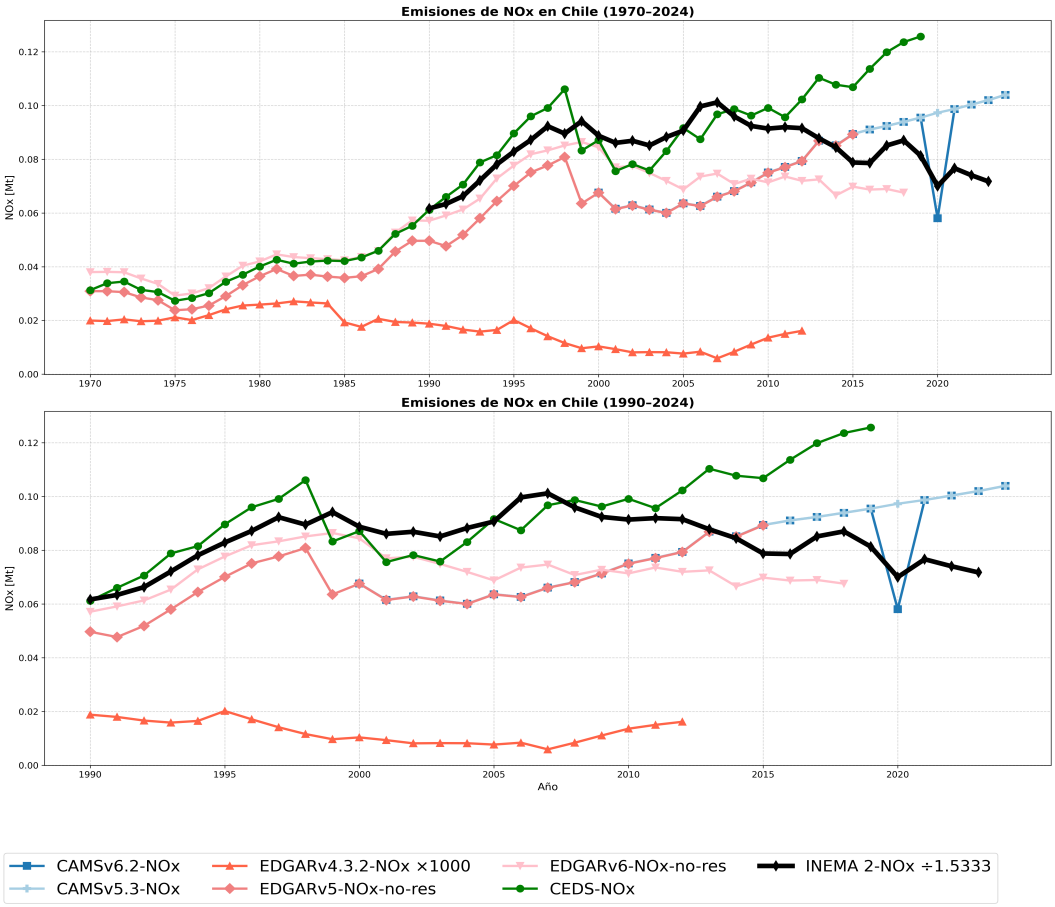


Figura 5.17: Emisiones de NOx en Chile según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V4.3.2,V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), INEMA

Las siguientes figuras presentan la evolución de las emisiones de BC, PM10, PM2.5 en Chile entre los años 1970 y 2024, estos datos se basan en estimaciones de inventarios internacionales y nacionales. Se muestran las emisiones con y sin resuspensión según la gráfica.

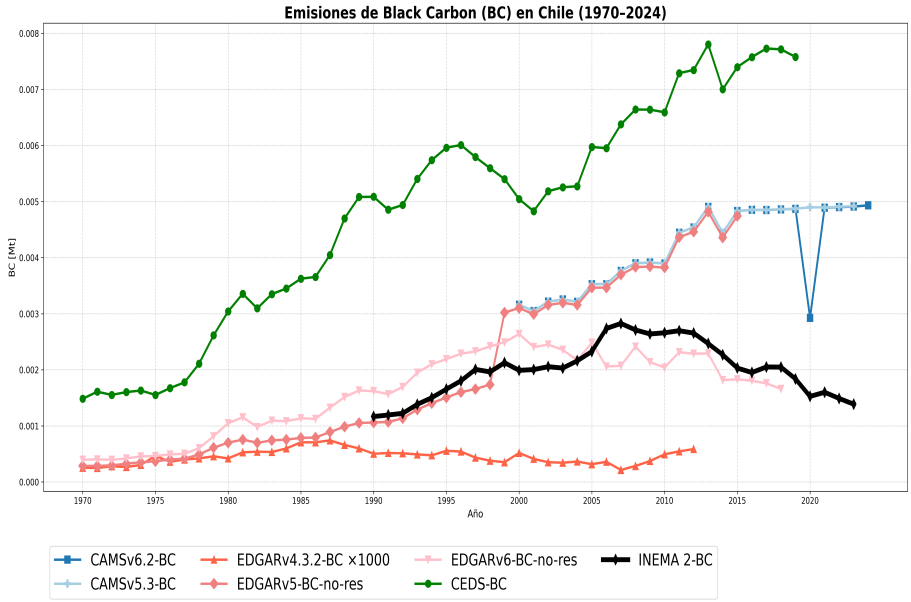


Figura 5.18: Emisiones de BC en Chile según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V4.3.2,V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3, V6.2), INEMA.

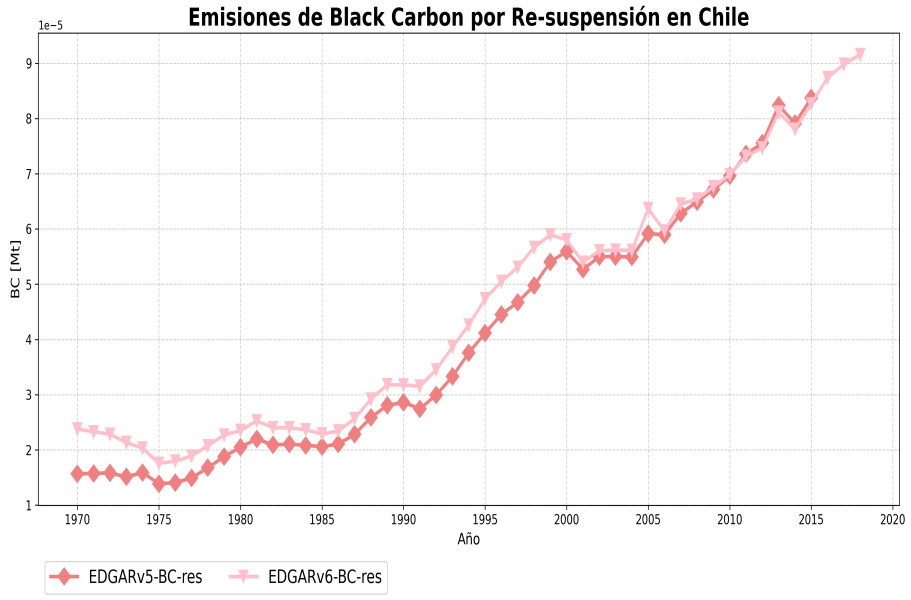


Figura 5.19: Emisiones de BC con resuspensión en Chile según inventarios internacionales (1970–2018), EDGAR (V5,V6).

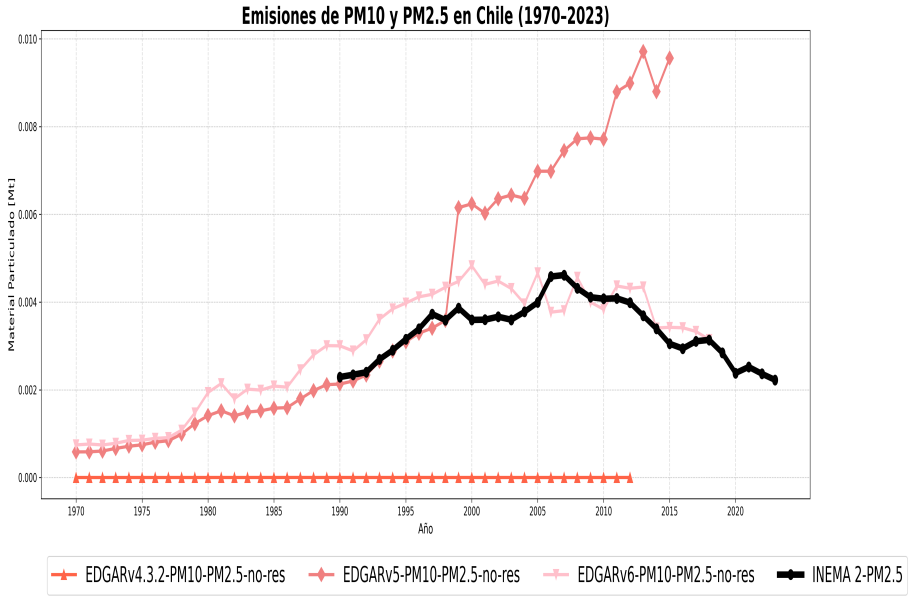


Figura 5.20: Evolución de emisiones de material particulado en Chile 1970–2023, EDGARD (V4.3.2,V5, V6), INEMA.

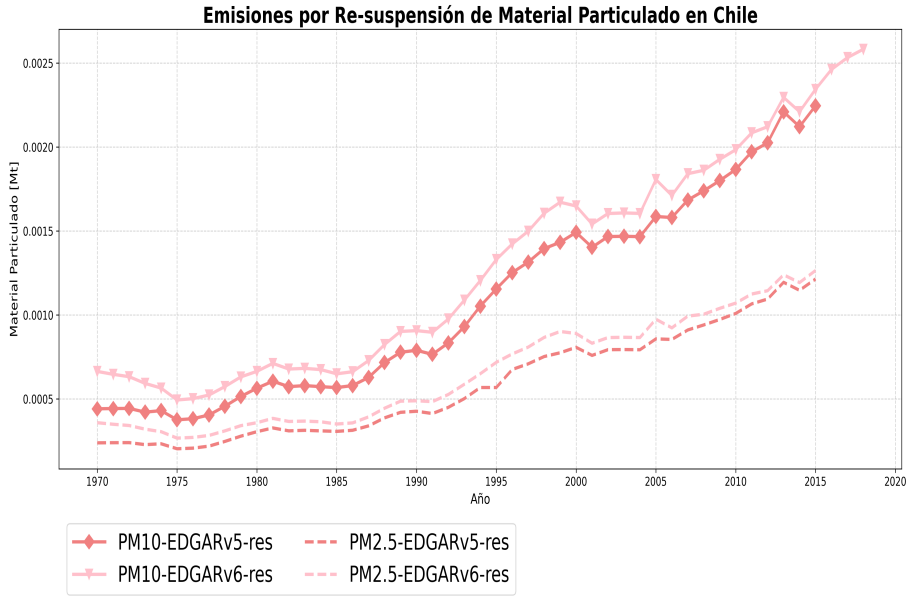


Figura 5.21: Evolución de emisiones de material particulado con resuspensión en Chile 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

5.3.1. Conclusiones

- Las tendencias de CO2 han subido en todas las fuentes analizadas, con la excepción del año 2020, donde se observa una caída atribuible a la pandemia. Esta disminución no se nota en CAMS V5.3.
- El inventario nacional INEMA presenta una evolución similar a las fuentes IEA y CEDS, aunque con valores más altos desde el año 2006.
- Los datos de INGEI presentan una tendencia y valores similares a los inventarios EDGAR V7 y CAMS V6.2, cabe destacar que las fuentes internacionales reportan emisiones de CO2 excluyendo el ciclo de carbono corto, mientras que INGEI entrega los datos sin separación por categoría.
- Para CO2, EDGAR V5 y CAMS V5.3 entregan datos con la misma tendencia.
- Respecto a NOx, CAMS (V5.3 y V6.2) y EDGAR V5 presentan valores y tendencias similares.
- Por su parte, EDGAR V6 presenta una evolución más estable en las emisiones de NOx, con menor variabilidad.
- Desde el año 1990, INEMA reporta las emisiones de BC y PM2.5 en Chile, sus valores son generalmente más bajos que los de las fuentes internacionales,pero similares a los de EDGAR V6, que excluye el componente de resuspensión en sus estimaciones.
- Con respecto a las emisiones de NOx, los valores de INEMA resultaban mayores que los de los inventarios internacionales, por ende se dividen por un factor de 1,5333.
- Respecto a las emisiones de BC, el inventario CEDS presenta los valores más altos entre todas las fuentes analizadas.
- CAMS (V5.3 y V6.2) y EDGAR V5 presentan valores y tendencias de emisiones similares de BC sin resuspensión.
- EDGAR (V5 y V6) presentan tendencias y valores similares de BC, PM10 y PM2.5 con resuspensión.

5.4. Colombia

La figura a continuación ilustra la evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Colombia desde el año 1970 hasta 2024. Se presentan dos gráficos, el primero muestra la tendencia completa a lo largo del periodo total, mientras que el segundo se enfoca a partir del año 1990, punto donde se dispone de datos del proyecto PAPILA.

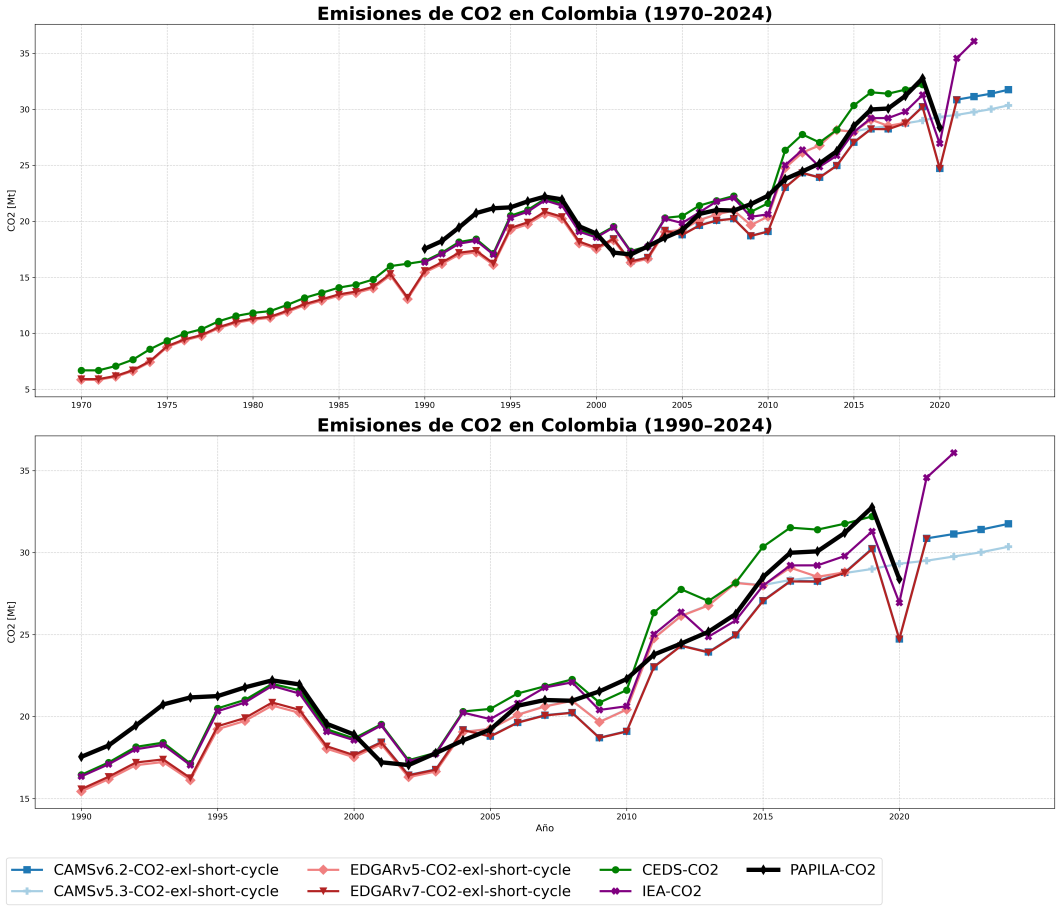


Figura 5.22: Emisiones de CO2 en Colombia según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V7), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), IEA, PAPILA.

La figura 5.23 presenta la evolución de las emisiones de dióxido de carbono atribuibles al ciclo orgánico en Colombia entre el año 2005 hasta el 2024,

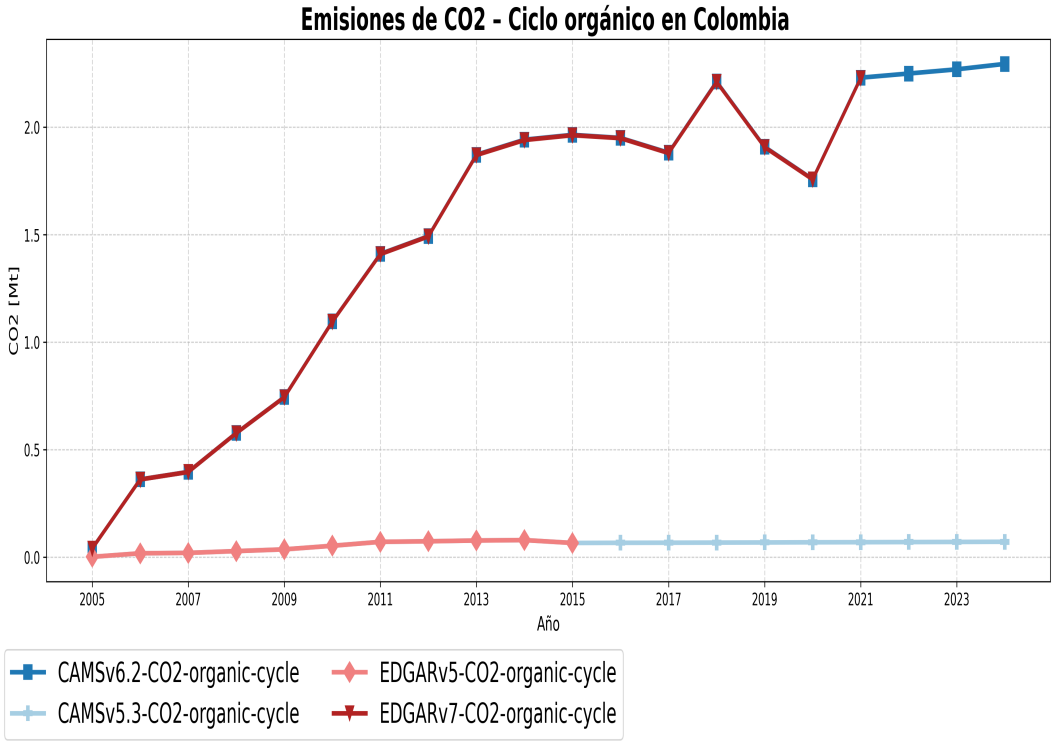


Figura 5.23: Emisiones de CO2–ciclo-orgánico en Colombia según inventarios internacionales (2005–2024), EDGAR (V5,V7), CAMS (V5.3, V6.2).

La Figura 5.24 muestra las emisiones de NOx en Colombia entre los años 1970 y 2024, se utilizan los inventarios de fuentes internacionales y nacionales en la gráfica. Cabe destacar que los datos de PAPILA han sido divididos por el factor 1,5333, esto se realizó con el fin de normalizar su escala, para que las fuentes puedan compararse de manera coherente.

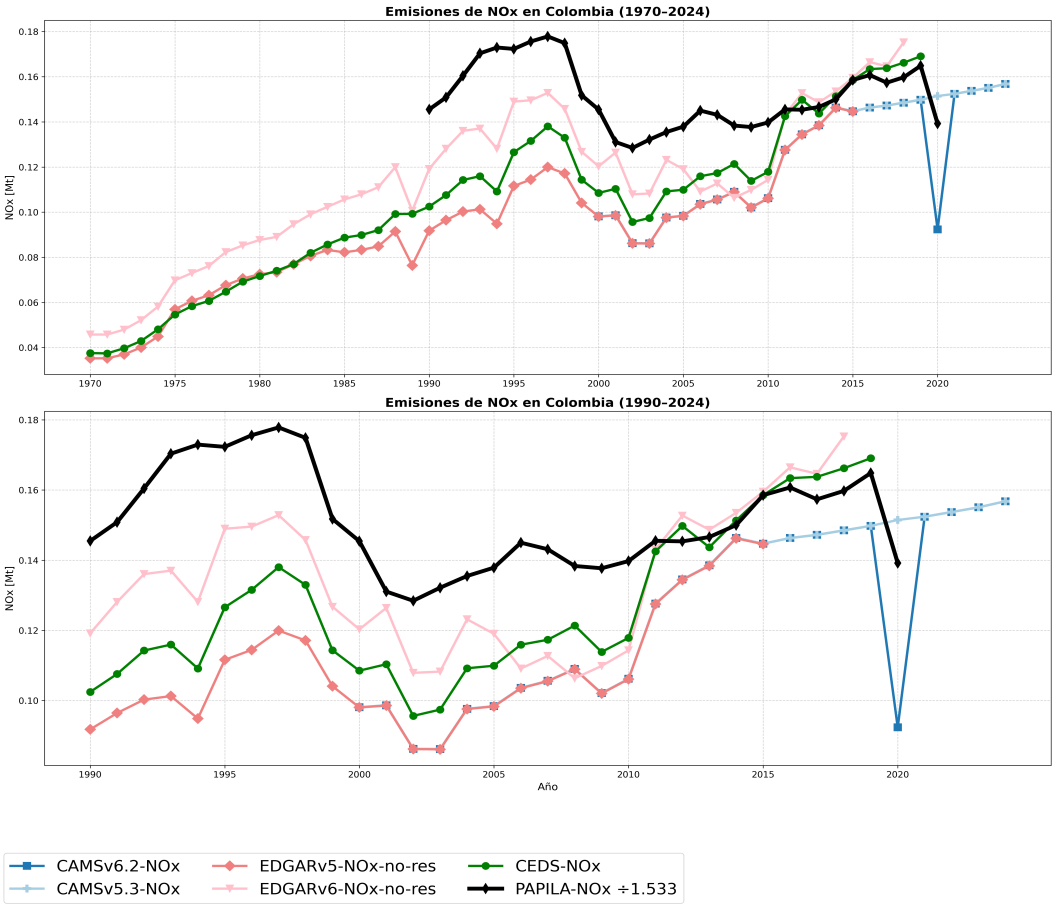


Figura 5.24: Emisiones de NOx en Colombia según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3,V6.2), PAPILA

Las siguientes figuras presentan la evolución de las emisiones de BC, PM10, PM2.5 en Colombia entre los años 1970 y 2024, estos datos se basan en estimaciones de inventarios internacionales y PAPILA.

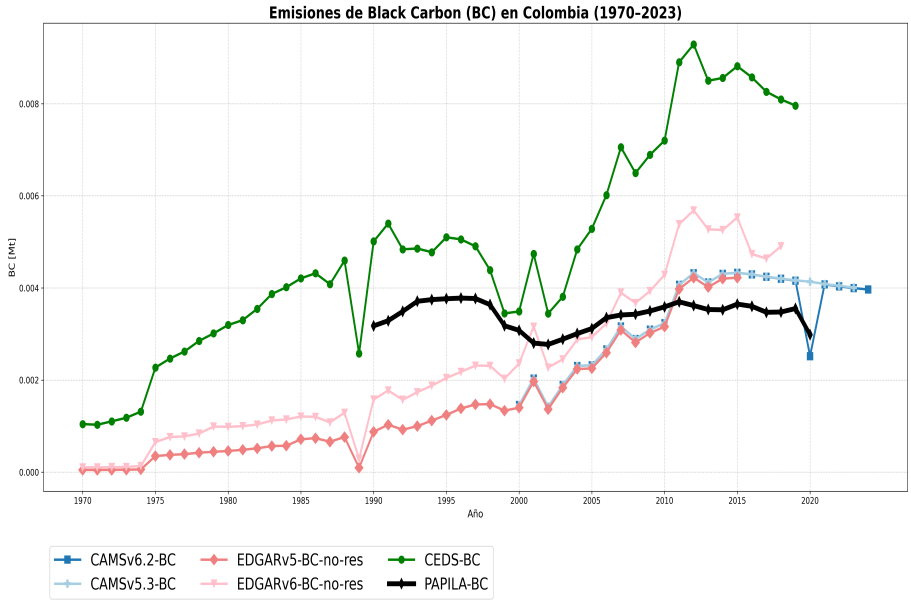


Figura 5.25: Emisiones de BC en Colombia según inventarios internacionales y nacionales (1970–2024), EDGAR (V5,V6), CEDS, CAMS (V5.3, V6.2), PAPILA.

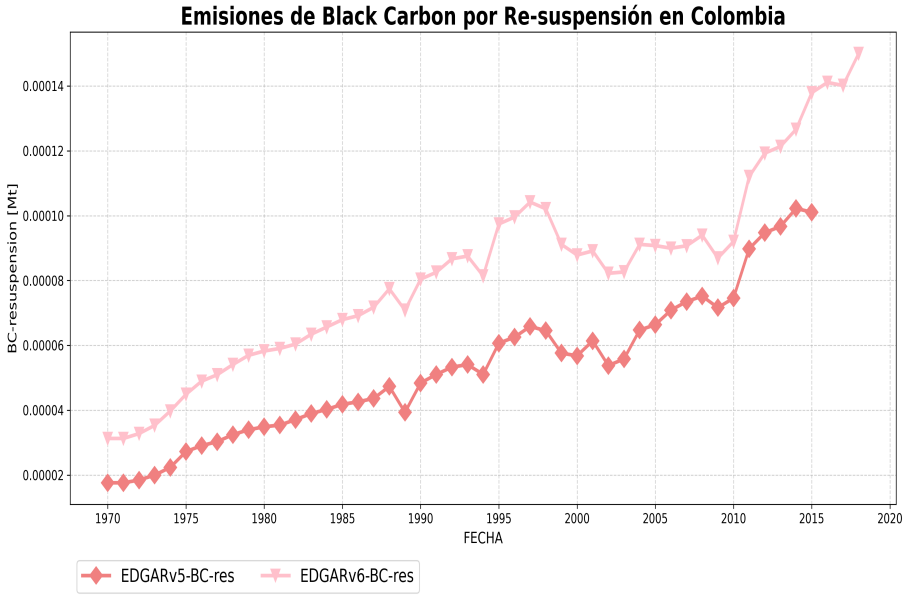


Figura 5.26: Emisiones de BC con resuspensión en Colombia según inventarios internacionales (1970–2018), EDGAR (V5,V6).

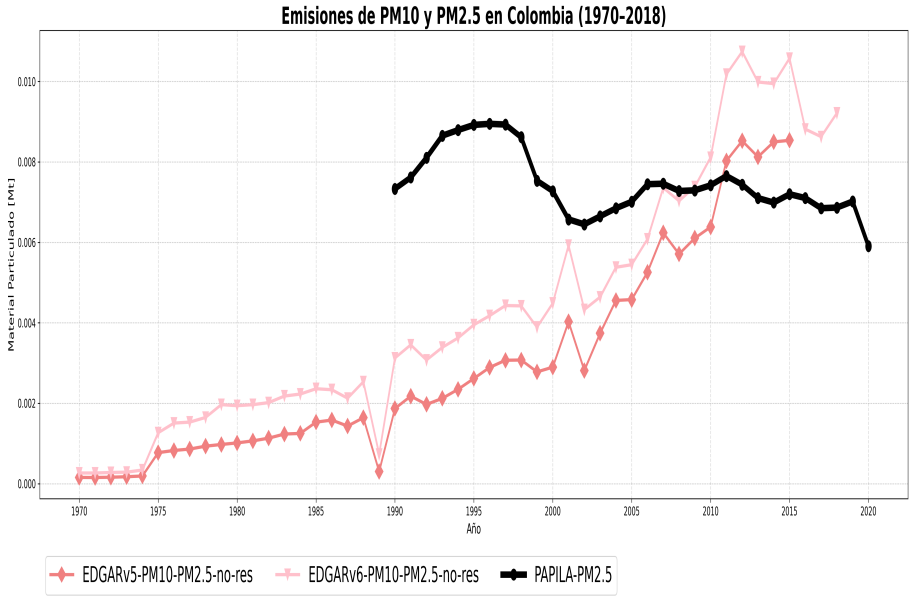


Figura 5.27: Evolución de emisiones de material particulado en Colombia 1970–2020, EDGARD (V5, V6), PAPILA.

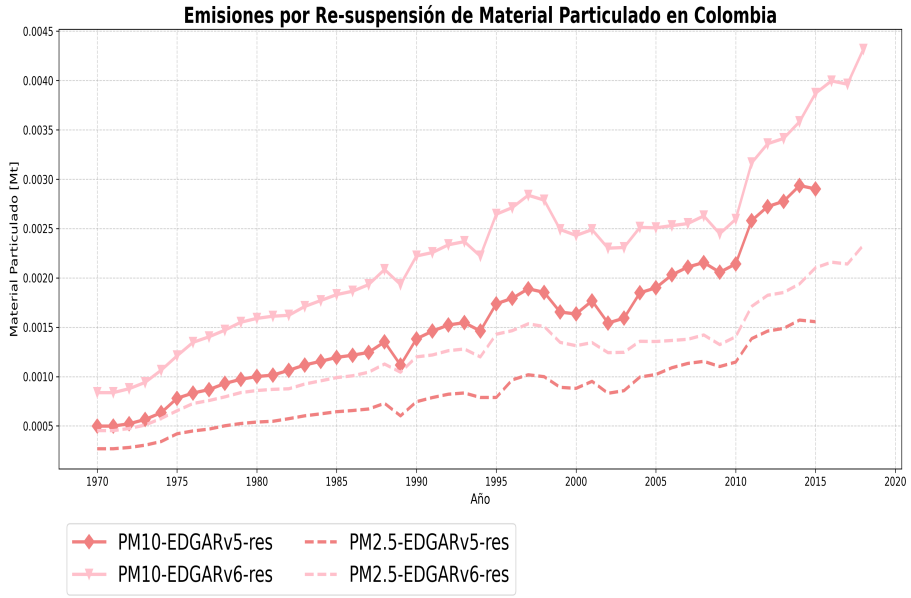


Figura 5.28: Evolución de emisiones de material particulado con resuspensión en Colombia 1970–2018, EDGARD (V5, V6).

5.4.1. Conclusiones

- Las emisiones de CO2 aumentan en todas las bases de datos internacionales, a excepción del año 2020, esta disminución no se observa en CAMS V5.3.
- En cuanto a CO2, IEA , CEDS y PAPILA presentan tendencias de emisiones similares.
- EDGAR V7 muestra una tendencia comparable a CAMS V6.2 en las emisiones de CO2-exc-short-cycle .
- Hasta el año 2015, CAMS V5.3 tiene una tendencia de emisiones de CO2-exc-short-cycle similar a la reportada por EDGAR V5.
- Los valores de emisiones de CO2 con ciclo orgánico reportados por CAMS V5.3 y EDGAR V5 son mínimos e iguales.
- CAMS V6.2 y EDGAR V7 presentan valores de emisiones de CO2 con ciclo orgánico idénticos.
- EDGAR V5 y CAMS (V5.3 y V6.2) presentan la misma tendencia de emisiones de NOx, diferenciándose únicamente en el valor del año 2020.
- PAPILA reportaba los valores más altos de emisiones de NOx, por esta razón, se aplicó un factor de corrección de 1,533, aun así, entre 1990 y 2011 sus valores siguen siendo superiores a los de otros inventarios, a partir de 2011, su tendencia es similar la de CEDS.
- Desde el año 2000, la emisiones de BC reportadas por PAPILA se encuentran en un rango similar a los inventarios EDGAR y CAMS.
- Respecto a las emisiones de BC, CEDS presenta los valores más altos.
- CAMS (V5.3, V6.2) y EDGAR V5 presentan tendencias de emisiones similares de BC, cabe recalcar que EDGAR V5 considera únicamente emisiones sin resuspensión.
- EDGAR V6 reporta niveles más altos de emisiones de BC con resuspensión en comparación con su version anterior.

- EDGAR V5 y V6 presentan los mismos valores de emisiones de PM10 y PM2.5 sin resuspensión, ademas EDGAR V6 presenta los valores mas altos entre ambas versiones.
- Hasta el año 2008 PAPILA registra las mayores emisiones de PM2.5.
- Para materia partículado con resuspensión, EDGAR V6 presenta los valores más altos.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones generales

Este informe presenta un análisis temporal de las tendencias de emisiones de los contaminantes dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, material particulado fino/grueso y carbono negro en Argentina, Brasil, Chile y Colombia. Para ello, se han considerado fuentes nacionales como SInIA, SEEG, INGEI, INEMA y PAPILA, así como los inventarios internacionales EDGAR, CEDS y CAMS, disponibles en ECCAD, además, de la base de datos de la IEA, en el análisis se noto patrones comunes, divergencias y eventos disruptivos como la pandemia del año 2020.

En Argentina, las emisiones de CO2 presentan una tendencia al alza, con una disminución evidente en el año 2020. En cuanto a NOx, se observa un crecimiento hasta 1998, seguido por una reducción hasta mediados de la década de los 2000 y luego un nuevo aumento con fluctuaciones hasta el presente. Las emisiones de BC muestran una trayectoria ascendente con variaciones hasta 1985, luego una baja marcada en 1998, posteriormente, una estabilización o leve incremento según el inventario, con descensos en 2009 y repuntes en 2011. Respecto al material particulado (PM10 y PM2.5), solo se tienen datos de EDGAR, los cuales indican un aumento hasta 1998 y luego una baja con fluctuaciones, siendo 2013 el año más destacado.

En Brasil, las emisiones de CO2 aumentan hasta el año 2014, luego descienden hasta 2020, posteriormente, se incrementan nuevamente. Las emisiones de NOx presentan una tendencia ascendente con fluctuaciones hasta 2014, seguida por una disminución continua. En cuanto al BC, se observa un crecimiento hasta 1991, una baja durante la década de 1990, un repunte en los años 2000 y una nueva caída en los 2010, sin embar-

go, la última versión de EDGAR muestra una tendencia descendente desde los años 90. Para PM10 y PM2.5, EDGAR indica un aumento en su versión más antigua, mientras que en la más reciente se observa un crecimiento hasta finales de los 90 seguido por una disminución.

En Chile, las emisiones de CO2 muestran una tendencia al alza pero con fluctuaciones en el tiempo, siendo el año 2020 un punto de inflexión. Las emisiones de NOx aumentan hasta 1998, luego disminuyen a comienzos de los 2000, y posteriormente se mantienen constantes o ascendentes según el inventario. En relación con el BC, los inventarios CEDS, CAMS y versiones antiguas de EDGAR indican un crecimiento con variaciones, mientras que INEMA y la versión más nueva de EDGAR reportan un aumento hasta mediados de la década de los 2000, seguido por una disminución. Para PM10 y PM2.5, la versión más reciente de EDGAR coincide con INEMA en mostrar un aumento hasta mediados de los 2000 y luego una baja, en cambio, la versión antigua reporta un crecimiento en el tiempo.

En Colombia, las emisiones de CO2 aumentan hasta 1998, luego descienden hasta 2002 y posteriormente se incrementan, con una baja notable en 2020. Las emisiones de NOx presentan un crecimiento hasta 1998, con caídas puntuales en 1989 y 1994, posteriormente, una baja abrupta hasta 2003, seguido por estabilidad hasta 2010 y luego un nuevo ascenso hasta 2024. En cuanto al BC, los inventarios internacionales muestran una tendencia ascendente con fluctuaciones en 1989, 2001 y 2020, mientras que la fuente local PAPILA reporta emisiones en un rango estable. Respecto a PM10 y PM2.5, EDGAR reporta un aumento en el tiempo, mientras que PAPILA señala que las emisiones se mantienen en un rango más constante.

6.2. Conclusiones especificas

6.2.1. Conclusiones revisión inventarios de datos nacionales e internacionales

Inventarios de datos internacionales

- En el Inventario ECCAD, las bases de datos que tienen información sobre las emisiones de BC y NOx en América del Sur son EDGAR (V4.3.2, V5, V6), CEDS y CAMS (V5.3 y V6.2), mientras que la información de PM10 y PM2.5 proviene de EDGAR (V4.3.2, V5 y V6).

- Los inventarios EDGAR (V5, V7) y CAMS (V5.3 y V6.2) muestran las emisiones de CO2 excluyendo el ciclo de carbono corto y el CO2 formado a partir del ciclo natural del carbono. Por otro lado el inventario CEDS presenta las emisiones de CO2 en su conjunto, sin distinguir explícitamente entre sus fuentes.

- Al comparar los datos, se observa que las emisiones clasificadas como CO2-organic-cycle son significativamente menores, mientras que las emisiones CO2-excl-short-cycle se asemejan más a los valores totales reportados por CEDS.

- EDGAR V4.3.2 entrega las emisiones de CO2 totales y excluyendo el ciclo de carbono corto, comparando los gráficos se nota que no existe una gran diferencia entre los datos.

- Aunque los valores reportados por EDGAR, CEDS y CAMS presentan diferencias en valores y cobertura temporal, las estimaciones de emisiones se mantienen dentro de un rango comparable.

- En el año 2020 los datos varían entre CAMS V5.3 y V6.2, pues la versión 5.3 no refleja el efecto de la pandemia.

- En el año 2004, para las emisiones de PM2.5, PM10 y NOx, los valores de EDGAR V6 disminuyen, a diferencia de EDGAR V4.3.2 y V5, que no presentan esta tendencia.

Inventarios de datos locales

- Argentina
  - CIAM y SInIA ponen a disposición información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero para distintos sectores, incluyendo transporte, en un periodo comprendido entre 1990 y 2020.
  - En 2018, se publicó el inventario de emisiones atmosféricas del sector energético argentino, el cual proporciona datos sobre las emisiones de contaminantes para el sector transporte y otros.
- Brasil
  - Los inventarios existentes se enfocan principalmente en los gases de efecto invernadero.
  - El SEEG proporciona datos anuales de emisiones para todas las regiones de Brasil y para diversos sectores, incluyendo transporte.
  - Se han realizado varios estudios sobre emisiones vehiculares en distintas ciudades, pero no se ha encontrado un estudio único a nivel nacional.
- Chile
  - El registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC) es una base de datos pública que recopila y difunde las emisiones de contaminantes como CO2, NOx, MP10 y MP2.5 en el sector transporte por carretera.
  - Los datos de la RETC abarcan desde el año 2005 hasta 2021 y están organizados por regiones, provincias, ciudades y comunas.
  - El Sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero de Chile (SNI) recopila las emisiones de gases de efecto invernadero.
  - El estudio INEMA calculó las emisiones generadas por el transporte en Chile durante el período 1990 hasta el 2023.
- Colombia
  - IDEAM elaboró un inventario nacional de gases de efecto invernadero, este cubre desde 1990 hasta 2021.

- El artículo “Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation” [32], publicado en 2023, presenta las emisiones generadas por el transporte por carretera en Colombia.

6.2.2. Conclusiones de tendencias de emisiones anuales para el sector trasporte reportadas por ECCAD e IEA

ECCAD

- EDGAR
  - EDGAR V4.3.2 tiene información únicamente para Chile y Argentina, además, los valores reportados presentan un orden de magnitud distinto en comparación con las versiones posteriores de EDGAR.
  - Aunque las cuatro versiones presentan curvas distintas, los valores de EDGAR V5, V6 y V7 están en un rango similar para cada contaminante, mientras que EDGAR V4.3.2 tiene valores en una escala más pequeña.
  - Las curvas de emisiones de BC en las distintas versiones son similares a las de PM10 y PM2.5, aunque sus valores son aproximadamente la mitad de los correspondientes al material particulado.
  - En todas las versiones, en el año 2009 se nota un aumento en las emisiones de CO2.
  - En EDGAR V5 y V7, las emisiones de CO2-org-cycle son consistentemente menores que las de CO2-exc-short-cycle en los cuatro países .
  - En EDGAR V5 y V6, los datos de PM10 y PM2.5 presentan variaciones cuando se trata de partículas en resuspensión, sin embargo, para el caso sin resuspensión, la diferencia en la quinta versión es mínima, mientras que en la versión seis los valores son idénticos.
  - Brasil registra las mayores emisiones de contaminantes al ambiente, seguido por Argentina, por otro lado Colombia y Chile presentan niveles más bajos, con tendencias similares entre ellos.
- CEDS
  - Para las emisiones de NOx, CO2 y BC, Brasil presenta las mayores emisiones, seguido por Argentina.

- Las tendencias de emisiones para Chile y Colombia son similares.
- Desde el año 2014, se muestra una tendencia a la baja en emisiones de NOx para los cuatro países.

- CAMS
  - Las curvas de emisiones de CO2, tanto de origen orgánico como excluyendo el ciclo corto del carbono, presentan una tendencia similar en las versiones CAMS V5.3 y V6.2.
  - Las curvas de CAMS V5.3 y V6.2 para BC y NOx siguen la misma tendencia, a excepción del año 2020, donde para V6.2 muestran una variación significativa, esta diferencia se atribuye a que la versión 5.3 no incorpora los efectos de la pandemia.
  - Para Brasil las emisiones de NOx disminuyen en el año 2014, lo contrario ocurre con Argentina, Chile y Colombia.

Comparación inventarios ECCAD

- La base de datos CEDS presenta los valores más altos para BC, NOx y CO2, esto se debe a que CEDS entrega el total de emisiones del sector transporte y no las separa en transporte por carretera y transporte terrestre fuera de carretera.
- Las curvas de EDGAR V5 y CAMS V6.2 siguen la misma tendencia, aunque la base de datos de CAMS se extiende hasta un periodo de tiempo más amplio, abarcando hasta el año 2024.

IEA

- Brasil lidera en emisiones de CO2 en la región, superando ampliamente al resto de los países.
- Todos los países muestran una tendencia creciente en sus emisiones a lo largo del período evaluado, con una caída visible el año 2020, probablemente provocada por el impacto de la pandemia y las restricciones asociadas.
- La tendencia de emisiones entre Chile y Colombia es similar.
- Al excluir a Brasil, Argentina se destaca como el país con mayores niveles de emisiones.

6.2.3. Conclusiones de tendencias de emisiones anuales reportadas por inventarios locales de países de América del Sur

Argentina

- Los datos de SInIA solo permiten observar la evolución de las emisiones de dióxido de carbono en Argentina entre 1990 y 2022.
- En la serie de tiempo se nota que al comienzo de las décadas de 1990 y 2000 las emisiones de CO2 presentan un aumento en el tiempo, mientras que en la década del 2010 las emisiones se mantienen constantes. Por otro lado, en el año 2020 estas bajan notoriamente debido a los efectos de la pandemia, aunque en los años 2021 y 2022 se registra una rápida recuperación.

Brasil

- En la serie de tiempo se nota que las emisiones de CO2 presentan un crecimiento sostenido desde la década de 1990, con un claro aumento a partir del año 2009 el cual se mantiene hasta el año 2014.
- Las emisiones de NOx alcanzaron su máximo valor entre los años 2010 y 2013, pero posteriormente han disminuido de manera continua.

Chile

- La serie de tiempo de INGEI evidencia un crecimiento constante de las emisiones de CO2, con leves estancamientos y caídas puntuales, pero con una clara trayectoria ascendente en el largo plazo. Por otro lado, los datos del inventario INEMA presentan una tendencia similar a los de INGEI pero con valores de emisiones más altos.
- Los datos de INEMA muestran que las emisiones de PM2.5 y BC aumentaron hasta el año 2007, para luego descender gradualmente. Aun así, se nota que las emisiones de carbono negro son menores que las de material particulado.
- Las emisiones de NOx muestran un crecimiento hasta el año 2007, seguido de una disminución progresiva que se extendió hasta el año 2016. Durante 2017 y 2018 se observó un repunte en los niveles, aunque en los años posteriores las emisiones retomaron su tendencia descendente.

Colombia

- La serie de tiempo de PAPILA muestra una tendencia ascendente de emisiones de CO2, con un crecimiento hasta el año 2019.
- Con respecto a las emisiones de BC y PM2.5, en los gráficos se nota que existe un máximo temprano en el año 1996 seguido por una caída y fluctuaciones posteriores.
- Entre 1990 y 1997 las emisiones de NOx muestran un aumento, luego hasta el año 2002 se muestra una caída significativa posiblemente debido a normativas ambientales, desde el 2003 las emisiones han aumentado con alta variabilidad.

6.2.4. Conclusiones análisis comparativo de emisiones en países de América del Sur

Argentina

- Todas las bases de datos reflejan una tendencia creciente en las emisiones de CO2 a lo largo del tiempo, sin embargo, se observa una excepción en el año 2020, donde la mayoría de las series de tiempo muestran una disminución, la única fuente que no sigue esta tendencia en dicho año es CAMS V5.3.
- Hasta el año 2009, los datos de SInIA siguen una tendencia similar a los de los inventarios internacionales, especialmente a los de la IEA.
- Desde el año 2010, los datos de SInIA son mayores a los de los inventarios internacionales.
- Los datos de EDGAR V4.3.2 presentan magnitudes inferiores en comparación con las demás versiones, por lo que se multiplican por un factor de 10.000 con el objetivo de normalizar las escalas y permitir una evaluación comparativa entre series.
- Excluyendo EDGAR V4.3.2, los datos de CO2 se encuentran en una escala similar, siendo los de la IEA y SInIA los que presentan mayores valores de emisiones.
- Las emisiones de CO2 orgánico son iguales para las versiones de EDGAR V7 y CAMS V6.2, mientras que las de EDGAR V5 coinciden con las de CAMS V5.3.

- Para las emisiones de NOx, los datos de CAMS V6.3 y V5.3 son iguales a los de EDGAR V5, con excepción de los valores del año 2020.
- Las curvas de EDGAR, CEDS y CAMS muestran una tendencia creciente en las emisiones de BC desde 1970, especialmente en las versiones que incluyen resuspensión, no obstante, se observa una leve baja en los años 1998, 2008 y 2012.
- Las curvas evidencian que las versiones de EDGAR que incluyen resuspensión (V5 y V6) presentan valores significativamente menores en comparación con las graficas sin resuspensión.
- En todas las versiones de EDGAR, los valores de PM10 y PM2.5 sin resuspensión son iguales.
- Para el material particulado con resuspensión, los valores de PM10 y PM2.5 son distintos, siendo EDGAR V6 la fuente que presenta las emisiones más altas.

Brasil

- Las curvas de emisiones de CO2 muestran una tendencia ascendente desde el año 1970, alcanzando su punto más alto en 2014 y 2023.
- La inclusión de los datos provenientes del SEEG a partir del año 1990 permite contextualizar los datos internacionales con registros locales. En particular, se evidencia una mayor similitud entre las series del SEEG y las estimaciones reportadas por la IEA y CEDS.
- las series de tiempo de emisiones de CO2 de la IEA y SEEG presentan los valores más altos, además, estas bases de datos tienen la misma tendencia con mínimas diferencias en sus valores.
- En el caso de las emisiones de CO2, se nota que CAMS (V5.3 y V6.2) y EDGAR (V5 y V7) presentan la misma tendencia hasta el año 2016.
- Para el CO2-exc-short-cycle, CAMS V6.2 y EDGAR V7 presentan los mismos valores.
- Para las emisiones de CO2, los valores reportados por CEDS son más bajos que los estimados por la IEA y el SEEG, esta diferencia no ocurre en el caso del NOx.

- Respecto a las emisiones de CO2-org-cycle, las curvas de EDGAR y CAMS presentan la misma tendencia hasta el año 2015.
- Desde el año 2014 se muestra una tendencia a la baja en emisiones de NOx.
- Los valores reportados por SEEG son mayores que los inventarios internacionales para las emisiones de NOx, por esta razón se dividen por un factor de 1,5333.
- Las emisiones de BC son aproximadamente el 50 % de las de material particulado.
- Las curvas evidencian que las versiones de EDGAR que incluyen resuspensión (V5 y V6) presentan valores significativamente menores en comparación con las graficas sin resuspensión.
- En todas las versiones de EDGAR, los valores de PM10 y PM2.5 sin resuspensión son iguales.
- Para el material particulado con resuspensión, los valores de PM10 y PM2.5 son distintos, y EDGAR V6 presenta las emisiones más altas.

Chile

- Las tendencias de CO2 han subido en todas las fuentes analizadas, con la excepción del año 2020, donde se observa una caída atribuible a la pandemia. Esta disminución no se nota en CAMS V5.3.
- El inventario nacional INEMA presenta una evolución similar a las fuentes IEA y CEDS, aunque con valores más altos desde el año 2006.
- Los datos de INGEI presentan una tendencia y valores similares a los inventarios EDGAR V7 y CAMS V6.2, cabe destacar que las fuentes internacionales reportan emisiones de CO2 excluyendo el ciclo de carbono corto, mientras que INGEI entrega los datos sin separación por categoría.
- Para CO2, EDGAR V5 y CAMS V5.3 entregan datos con la misma tendencia.
- Respecto a NOx, CAMS (V5.3 y V6.2) y EDGAR V5 presentan valores y tendencias similares.

- Por su parte, EDGAR V6 presenta una evolución más estable en las emisiones de NOx, con menor variabilidad.
- Desde el año 1990, INEMA reporta las emisiones de BC y PM2.5 en Chile, sus valores son generalmente más bajos que los de las fuentes internacionales,pero similares a los de EDGAR V6, que excluye el componente de resuspensión en sus estimaciones.
- Con respecto a las emisiones de NOx, los valores de INEMA resultaban mayores que los de los inventarios internacionales, por ende se dividen por un factor de 1,5333.
- Respecto a las emisiones de BC, el inventario CEDS presenta los valores más altos entre todas las fuentes analizadas.
- CAMS (V5.3 y V6.2) y EDGAR V5 presentan valores y tendencias de emisiones similares de BC sin resuspensión.
- EDGAR (V5 y V6) presentan tendencias y valores similares de BC, PM10 y PM2.5 con resuspensión.

Colombia

- Las emisiones de CO2 aumentan en todas las bases de datos internacionales, a excepción del año 2020, esta disminución no se observa en CAMS V5.3.
- En cuanto a CO2, IEA , CEDS y PAPILA presentan tendencias de emisiones similares.
- EDGAR V7 muestra una tendencia comparable a CAMS V6.2 en las emisiones de CO2-exc-short-cycle .
- Hasta el año 2015, CAMS V5.3 tiene una tendencia de emisiones de CO2-exc-short-cycle similar a la reportada por EDGAR V5.
- Los valores de emisiones de CO2 con ciclo orgánico reportados por CAMS V5.3 y EDGAR V5 son mínimos e iguales.
- CAMS V6.2 y EDGAR V7 presentan valores de emisiones de CO2 con ciclo orgánico idénticos.

- EDGAR V5 y CAMS (V5.3 y V6.2) presentan la misma tendencia de emisiones de NOx, diferenciándose únicamente en el valor del año 2020.
- PAPILA reportaba los valores más altos de emisiones de NOx, por esta razón, se aplicó un factor de corrección de 1,533, aun así, entre 1990 y 2011 sus valores siguen siendo superiores a los de otros inventarios, a partir de 2011, su tendencia es similar la de CEDS.
- Desde el año 2000, la emisiones de BC reportadas por PAPILA se encuentran en un rango similar a los inventarios EDGAR y CAMS.
- Respecto a las emisiones de BC, CEDS presenta los valores más altos.
- CAMS (V5.3, V6.2) y EDGAR V5 presentan tendencias de emisiones similares de BC, cabe recalcar que EDGAR V5 considera únicamente emisiones sin resuspensión.
- EDGAR V6 reporta niveles más altos de emisiones de BC con resuspensión en comparación con su version anterior.
- EDGAR V5 y V6 presentan los mismos valores de emisiones de PM10 y PM2.5 sin resuspensión, ademas EDGAR V6 presenta los valores mas altos entre ambas versiones.
- Hasta el año 2008 PAPILA registra las mayores emisiones de PM2.5.
- Para materia partículado con resuspensión, EDGAR V6 presenta los valores más altos.

6.3. Recomendaciones

A partir del análisis realizado en el presente estudio, se recomienda ampliar el uso de factores de normalización, puesto que, en este trabajo se aplicó un único factor para las emisiones de NOx reportados por los inventarios SEEG, PAPILA e INEMA, sin embargo, sería adecuado investigar si existen factores equivalentes para otros contaminantes, esto con el fin de facilitar la comparación entre fuentes.

Por otro lado, para profundizar el análisis de las emisiones de contaminantes en el sector transporte, se recomienda incorporar categorías que actualmente no son reportadas en los inventarios utilizados. Durante la revisión bibliográfica se identificó que EDGAR contiene la fuente HTAP V3, sin embargo, los datos asociados a esta no están disponibles para descarga, aun así, esta tiene información sobre la categoría Road-transportation-non-exhaust. Incorporar estos datos permitiría complementar la investigación sobre emisiones en países de América del Sur.

Bibliografía

[1] M. de Fátima Andrade, R. Y. Ynoue, E. D. Freitas, E. Todesco, A. Vara Vela, S. Ibarra, L. D. Martins, J. A. Martins, C. R. Mazzoli, and R. Hallak. Air quality forecasting system for southeastern brazil. Frontiers in Environmental Science, 3:9, 2015.

[2] J.G. Canadell, P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, editors, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pages 673–816. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.

[3] Climate and Clean Air Coalition. Institute for energy and environment (iema). `https://www.ccacoalition.org/es/partners/institute-energy-and-environment-iema`. Consultado: 3 de junio de 2025.

[4] M. Crippa, D. Guizzardi, M. Muntean, and E. Schaaf. Edgar v5.0 global air pollutant emissions. Earth System Science Data Discussions, 2021.

[5] M. Crippa, D. Guizzardi, M. Muntean, E. Schaaf, F. Dentener, J. A. van Aardenne, S. Monni, U. Doering, J. G. J. Olivier, V. Pagliari, and G. Janssens-Maenhout. Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within edgar v4.3.2. Earth System Science Data Discussions, 2018.

[6] M. Crippa, D. Guizzardi, E. Solazzo, M. Muntean, E. Schaaf, F. Monforti-Ferrario, M. Banja, J. G. J. Olivier, G. Grassi, S. Rossi, and E. Vignati. Ghg emissions of all world countries - 2021 report. Publications Office of the European Union, EUR 30831 EN:223–2259, 2022.

[7] M. Crippa, G. Oreggioni, D. Guizzardi, M. Muntean, E. Schaaf, E. Lo Vullo, E. Solazzo, F. Monforti-Ferrario, J. Olivier, and E. Vignati. Fossil CO2 and GHG emissions of all world countries: 2019 report. Publications Office Luxembourg, 2019.

[8] Sabine Darras, Claire Granier, Catherine Liousse, Damien Boulanger, Nellie Elguindi, and Hung Le Vu. The eccad database, version 2: Emissions of atmospheric compounds & compilation of ancillary data. IGAC Newsletter, 2025.

[9] Sabine Darras, Claire GRANIER, Cathy LIOUSSE, Thierno DOUMBIA, Sekou KEITA, and Antonin SOULIÉ. The eccad database: access to a variety of inventories of emissions for greenhouse gases and air pollutants.

[10] Agencia Internacional de Energía. Latin america energy outlook, 2023.

[11] Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Entenda as estimativas, 2025. Accedido el 16 de Abril de 2025.

[12] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Inventario de emisiones para la ciudad de santiago de cali. Technical report, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2018.

[13] Ann Florini. The international energy agency in global energy governance. Global Policy, 2:40–50, 2011.

[14] C. Granier, S. Darras, H. Denier van der Gon, J. Doubalova, N. Elguindi, B. Galle, M. Gauss, M. Guevara, J.-P. Jalkanen, J. Kuenen, C. Liousse, B. Quack, D. Simpson, and K. Sindelarova. The copernicus atmosphere monitoring service global and regional emissions (april 2019 version). Report April 2019 version, 2019.

[15] Sergio Ibarra-Espinosa, Ryoichi Y. Ynoue, David O'Sullivan, Prashant Kumar, Edmilson D. de Freitas, and Maria de Fátima Andrade. Vein v0.2.2: an r package for bottom-up vehicular emissions inventories. Geoscientific Model Development, 11(6):2209–2229, 2018.

[16] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Inventario nacional de emisiones y absorciones atmosféricas de gases de efecto invernadero – colombia. Technical report, IDEAM - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 2023. Consultado en julio de 2025.

[17] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, Geneva, Switzerland, 2006. Consultado en julio de 2025.

[18] International Energy Agency. Latin America to play an essential role in the global transition to a more secure and sustainable energy system, 2023.

[19] International Energy Agency. About - IEA, 2024.

[20] International Energy Agency. Chile: Emissions, 2024. Consultado el 5 de junio de 2025.

[21] IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Volumen 2 – Energía. Capítulo 3: Combustión en fuentes móviles. Instituto de Investigación Ambiental Global (IGES), Hayama, Japón, 2006. Sección 3.2, p. 3.10.

[22] IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Volumen 2 – Energía. Capítulo 3: Combustión en fuentes móviles. Instituto de Investigación Ambiental Global (IGES), Hayama, Japón, 2006. Sección 3.3: Fuentes móviles no viales.

[23] Erin E McDuffie, Steven J Smith, Patrick O'Rourke, Kushal Tibrewal, Chandra Venkataraman, Eloise A Marais, Bo Zheng, Monica Crippa, Michael Brauer, and Randall V Martin. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector-and fuel-specific sources (1970–2017): an application of the community emissions data system (ceds). Earth System Science Data, 12(4):3413–3442, 2020.

[24] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Centro de Información Ambiental Minero (CIAM), 2025. [En línea; accedido el 15-Abril-2025].

[25] Ministerio del Medio Ambiente. ¿qué es el retc?, 2023.

[26] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero de chile (snichile), 2025. Consultado el 3 de junio de 2025.

[27] Patrick O'Rourke, Steven J. Smith, Andrea R. Mott, Hamza Ahsan, Erin E. Mcduffie, Monica Crippa, Zbigniew Klimont, Brian Mcdonald, Shuxiao Wang, Matthew B. Nicholson, Rachel M. Hoesly, and Leyang Feng. Ceds v_2021_04_21 gridded emissions data. PNNL Data Hub, 2021.

[28] Juan E. Pachón, Javier Jaramillo, Eduardo Rojas, Sonia Peña, and Mauricio García. Inventario de emisiones para la megaciudad de bogotá: 2012. Revista Facultad de Ingeniería, 27(48):72–83, 2018.

[29] Vincent-Henri Peuch, Richard Engelen, Michel Rixen, Dick Dee, Johannes Flemming, Martin Suttie, Melanie Ades, Anna Agustí-Panareda, Cristina Ananasso, Erik Andersson, et al. The copernicus atmosphere monitoring service: From research to operations. Bulletin of the American Meteorological Society, 103(12):E2650–E2668, 2022.

[30] Salvador Enrique Puliafito, Paula Soledad Castesana, David Gabriel Allende, María Florencia Ruggeri, Sebastian Pinto, et al. Inventario de emisiones atmosféricas del sector energético argentino. Proyecciones, 16:49–64, 2018.

[31] Néstor Y. Rojas, Sonia C. Mangones, Mauricio Osses, Claire Granier, Ignacio Laengle, Julieth V. Alfonso A., and Johann A. Mendez. Road transport exhaust emissions in colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 123:103780, 2023.

[32] Néstor Y. Rojas, Sonia C. Mangones, Mauricio Osses, Claire Granier, Ignacio Laengle, Julieth V. Alfonso A., and Johann A. Mendez. Road transport exhaust emissions in colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 119:103780, 2023.

[33] Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Metodologia – seeg brasil. `https://seeg.eco.br/metodologia/`, 2025. Consultado en julio de 2025.

[34] J.S Smith, Y. Zhou, P. Kyle, H. Wang, and H. Yu. A community emissions data system (ceds) : Emissions for cmip6 and beyond. In International Emission Inventory Conference, pages 19395–19409, 2015.

[35] Efisio Solazzo, Monica Crippa, Diego Guizzardi, Marilena Muntean, Margarita Choulga, and Greet Janssens-Maenhout. Uncertainties in the emissions database for global atmospheric research (edgar) emission inventory of greenhouse gases. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(7):5655–5683, 2021.

[36] A. Soulie, C. Granier, S. Darras, N. Zilbermann, T. Doumbia, M. Guevara, J.-P. Jalkanen, S. Keita, C. Liousse, M. Crippa, D. Guizzardi, R. Hoesly, and S. J. Smith. Global anthropogenic emissions (cams-glob-ant) for the copernicus atmosphere monitoring service simulations of air quality forecasts and reanalyses. Earth System Science Data, 2023.

[37] Nicolás Álamos, Nicolás Huneeus, Mariel Opazo, Mauricio Osses, Sebastián Puja, Nicolás Pantoja, Hugo Denier van der Gon, Alejandra Schueftan, René Reyes, and Rubén Calvo. High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining and residential activities in chile. Earth System Science Data, 14(1):361–379, 2022. Consultado en julio de 2025.