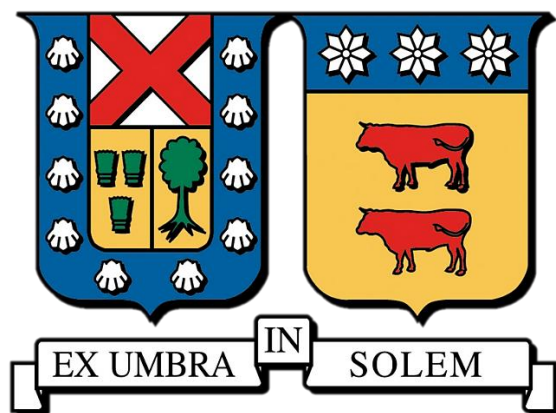


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



Estimación de emisiones de MP2,5 y carbono negro
por desgaste abrasivo en vehículos de carretera en
Chile y Colombia.

Kabir Lalit Daswani Daswani

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Ing. Mauricio Osses

Profesor Co-referente: Dr. Ing. German Amador

Profesor Co-referente: Ing. Néstor Rojas

Enero 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Estimación de emisiones de MP2.5 y carbono negro por desgaste de frenos en vehículos de carretera en Chile y Colombia

Nombre del candidato(a): Kabir Lalit Darwani Darwani

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: San Joaquín Departamento: Ingeniería 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):

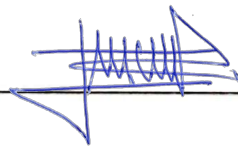
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 26/01/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/01/2026

Firma: 

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

Tabla de contenido

Agradecimientos	IV
Resumen	V
Abstract.....	VI
Glosario	VII
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XI
Introducción.....	1
Objetivo	4
1. Marco Teórico.....	5
1.1. Frenos	6
1.2. Neumáticos	9
1.3. Carretera	12
1.4. Transición eléctrica.....	13
1.5. Estudio de literatura.....	15
1.5.1. EMEP (2024).....	16
1.5.2. Benjamín Encalada (2023)	21
1.5.3. Q. Zhang et al. (2024).....	25
1.5.4. Lee et al. (2023).....	29
1.5.5. Yin et al. (2025).....	32
1.5.6. Storch et al. (2023)	35
1.5.7. Grigoratos et al. (2023).....	38
1.5.8. Comentarios de análisis bibliográfico inicial	41
2. Metodología de desarrollo	42
2.1. Metodología de revisión bibliográfica inicial.....	42
2.2. Metodología de obtención de factores de emisión	42
2.3. Obtención de actividad vehicular por categoría para Chile y Colombia.....	46
2.4. Metodología de cálculo de emisiones de PM2,5 y carbono negro	50
3. Resultados.....	51
3.1. Obtención de factores de emisión.....	51
3.2. Estimación de emisiones para Chile	57

3.3.	Estimación de emisiones para Colombia.....	62
3.4.	Comparación de emisiones entre Chile y Colombia	67
4.	Conclusiones.....	70
4.1.	Conclusión general	70
4.2.	Conclusiones específicas	70
4.3.	Recomendaciones	72
	Bibliografía.....	74
	Anexo 1	80
	Anexo 2	83
	Anexo 3	85

Agradecimientos

Deseo dedicar este trabajo, en primer lugar, a mi madre, Karina, y a mi hermano, Viren. También a mi padre, Lalit, quien ya no está físicamente con nosotros, pero sé que me anima desde arriba. Los tres me han apoyado incondicionalmente toda la vida y arriesgaron todo al venir a Santiago para que yo pudiera estudiar mi carrera. Me siento profundamente bendecido por tenerlos y nada de esto habría sido posible sin ustedes.

Le quiero dar las gracias a todos mis tíos, tías y abuelos en India, quienes siempre me han alentado a pesar de la distancia. Un agradecimiento especial para mis primos, Shikha, Vidhi y Havish, quienes han sido mi apoyo emocional y he podido compartir todas mis luchas y victorias a lo largo de este proceso universitario.

Quiero dar las gracias a todos los amigos que he tenido la fortuna de hacer en mi vida; a mis amigos de la infancia en Iquique, Ashu, Gau, Khush y Chirag, por siempre estar ahí para mí, a pesar de estar en diferentes partes del mundo; y en Santiago, a Aryan y Aisha, cuya bonita amistad me acompañó cuando era nuevo en la ciudad sin conocer a nadie, y a quienes considero como hermanos. También dedico este trabajo a todos los amigos que hice durante la universidad, con quienes compartí risas, historias y mutuo desahogo por el estrés académico. Un agradecimiento muy especial para Pablo, Diego y Claudio, con quienes formé una amistad durante la universidad que perdura desde los primeros años hasta hoy, haciendo casi todos los trabajos grupales juntos. Sepan que siempre estaré ahí para ustedes, como ustedes lo estuvieron para mí.

Finalmente, deseo expresar mi profundo agradecimiento al profesor Mauricio Osses, cuyo nivel de apoyo y guía es el que cualquier estudiante soñaría tener, y por confiar siempre en mis capacidades. Le agradezco también por incluirme en el proyecto Fondecyt Regular 1241477, donde conocí a un equipo que me brindó un apoyo crucial para la realización de este trabajo.

Resumen

Las emisiones de material particulado (MP) adquieren relevancia significativa debido a su asociación con el aumento del riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, afectando de manera particular a mujeres embarazadas y a la población infantil. Si bien la mayor parte de los estudios se han centrado en las emisiones generadas por los sistemas de escape de los vehículos, las provenientes del desgaste abrasivo constituyen una fuente muy importante de material particulado, cuyo aporte a las emisiones totales a nivel nacional requiere que sea cuantificado. Estas emisiones por desgaste se clasifican en tres categorías principales: frenos, neumáticos y carretera. Dentro de la fracción fina de material particulado (PM_{2,5}) se encuentra el carbono negro, un componente que destaca por sus propiedades de absorción de radiación, con impactos considerables sobre el cambio climático. Se ha estudiado que su inhalación en concentraciones elevadas se ha vinculado a efectos adversos en la salud respiratoria y cardiovascular, lo que ha generado inquietud por parte de la comunidad científica a nivel global.

En este trabajo se busca calcular las emisiones de PM_{2,5} y carbono negro generadas por el desgaste abrasivo de las tres fuentes mencionadas. Primeramente, se realiza un estudio bibliográfico inicial, con fin de conocer las metodologías empleadas para la obtención de los datos utilizados en una estimación de emisiones. Luego, a través de la metodología PRISMA, realizar búsquedas bibliográficas estandarizadas, obteniendo los factores de emisión para cinco categorías vehiculares definidas: Vehículos de carga pesada, comerciales livianos, motocicletas, vehículos pasajeros convencionales, y vehículos pasajeros eléctricos. Mediante bases de datos de kilometrajes vehiculares, se calcula la actividad vehicular de cada categoría, permitiendo realizar el cálculo de las emisiones totales, tanto para Chile como Colombia.

Para Chile se obtiene que las emisiones de PM_{2,5} y carbono negro para el año 2025 alcanzan valores de 1,862 [Gg] y 0,111 [Gg], respectivamente. Para la estimación de Colombia se obtienen emisiones de 2,377 [Gg] para PM_{2,5} y 0,137 [Gg] para carbono negro. Mediante información de emisiones por tubo de escape, se obtiene que, en Chile, para el año 2025, las emisiones de PM_{2,5} representan el 45,5% del total, y las emisiones por abrasión de carbono negro componen el 7,5% del total de carbono negro emitido. Para Colombia, las emisiones por desgaste representaron un 28,2% del total de PM_{2,5} y un 4,3% del total de carbono negro. En la comparación de las emisiones totales entre Chile y Colombia, se observa que las emisiones de Colombia son 1,28 veces mayores para PM_{2,5} y 1,23 veces mayores para el carbono negro.

Abstract

Particulate matter emissions (PM) have gained significant relevance due to their association with increased risks of respiratory and cardiovascular diseases, particularly affecting pregnant women and children. While most studies have focused on emissions generated by vehicle exhaust systems, those originating from abrasive wear constitute a substantial source of particulate matter, whose contribution to total national emissions requires comprehensive quantification and analysis. These wear-related emissions are classified into three main categories: brakes, tires, and road surface. Within the fine fraction of particulate matter (PM_{2,5}) lies black carbon, a component notable for its high radiation absorption properties and its considerable impacts on climate change. Moreover, exposure to elevated concentrations of black carbon has been linked to adverse respiratory and cardiovascular health effects, prompting growing attention from the global scientific community.

This study aims to estimate PM_{2,5} and black carbon emissions generated by abrasive wear from the three sources mentioned. An initial literature review was conducted to identify the methodologies employed in emission estimation. Subsequently, through the PRISMA methodology, which enables standardized bibliographic research, emission factors were obtained for five defined vehicle categories: heavy-duty trucks, light commercial vehicles, motorcycles, conventional passenger vehicles, and electric passenger vehicles. Using vehicular mileage databases, the activity of each vehicle category was determined, allowing for the calculation of total emissions for both Chile and Colombia.

For Chile, PM_{2,5} and black carbon emissions for the year 2025 were estimated at 1.862 Gg and 0.111 Gg, respectively. For Colombia, the corresponding emissions were 2.377 Gg for PM_{2,5} and 0.137 Gg for black carbon. When compared with exhaust emissions data, results show that in Chile, PM_{2,5} emissions from abrasive wear account for 45.5% of the total, while black carbon from wear represents 7.5% of total black carbon emissions. In Colombia, wear-related emissions represented 28.2% of total PM_{2,5} and 4.3% of total black carbon. A comparison between both countries indicates that Colombia's total emissions are 1.28 times higher for PM_{2,5} and 1.23 times higher for black carbon than those of Chile.

Glosario

1. **Abrasión:** Proceso de desgaste de material en la superficie de un cuerpo causado por la fricción mecánica y el contacto relativo con otro cuerpo en movimiento.
2. **BC:** Carbono negro, correspondiente a una categoría de PM_{2,5} que tiene propiedades de radiación altas, generando un efecto negativo en la atmósfera.
3. **BEV:** Vehículo eléctrico puro, con sistema de propulsión en base a una batería.
4. **Ciclo de conducción:** Perfil estandarizado compuesto por segmentos de velocidades y aceleraciones, con el fin de simular las condiciones reales de manejo, principalmente utilizadas para homologaciones vehiculares y mediciones de emisiones.
5. **Exhaust emissions (EE):** Emisiones generadas por procesos de combustión vehiculares, liberadas al ambiente mediante un tubo de escape.
6. **HDV:** Vehículos de carga pesada con capacidad de circular en entornos urbanos.
7. **Intervalo de confianza:** Rango de valores de una muestra, para el cual se estima que se encuentre ubicado el valor verdadero de dicho parámetro, con un nivel de probabilidad específico.
8. **LCV:** Vehículos comerciales livianos principalmente encargados del transporte de pasajeros y mercancía.
9. **LM:** Tipo de pastillas de freno compuesto por metales blandos en baja proporción y materiales orgánicos.
10. **MOT:** Vehículos de dos ruedas motorizados, con capacidad de circular en carreteras urbanas.
11. **NAO:** Tipo de pastillas de freno compuesto por materiales orgánicos sin amianto.
12. **Non-exhaust emissions (NEE):** Emisiones generadas por procesos vehiculares mecánicos y abrasivos, que no se emiten a través del tubo de escape.
13. **PC:** Vehículos livianos a motor de combustión interna destinado al transporte de pasajeros.
14. **PC-EV:** Vehículo eléctrico liviano destinado al transporte de pasajeros.

15. **PHEV:** Vehículo híbrido enchufable, con capacidad de funcionar mediante una batería y un motor de combustión interna.
16. **PM10/MP10:** Material particulado con diámetro menor o igual a 10 micrómetros.
17. **PM2,5/MP2,5:** Material particulado con diámetro menor o igual a 2,5 micrómetros.
18. **Top-down:** Enfoque que estima las emisiones totales a partir de datos agregados a gran escala, y luego las desagrega según zonas o categorías vehiculares.
19. **TSP:** Partículas totales suspendidas, considerando partículas de todo tamaño y partículas depositadas que se suspendieron nuevamente.
20. **VKT:** Kilómetros recorridos por el vehículo (Actividad vehicular).

Lista de figuras

Figura 1: Componentes de un sistema de frenado por disco [3].	6
Figura 2: Diagrama de componentes de un freno de tambor [6].	7
Figura 3: Distribución elemental de emisiones de freno [9].	9
Figura 4: Modelo de tasa de desgaste de neumático en función de la velocidad [17].	11
Figura 5: Regresión de factores de emisión por procesos abrasivos en función de la masa vehicular [26].	14
Figura 6: Comparación de niveles de emisión PM _{2,5} [Gg/año] entre emisiones de escape y desgaste abrasivo entre 2018-2020 [30].	23
Figura 7: Comparación de niveles de emisión PM ₁₀ [Gg/año] entre emisiones por escape y desgaste abrasivo 2018-2020 [30].	23
Figura 8: Proyección de las emisiones de PM _{2,5} para el año 2050 considerando distintos escenarios [30].	24
Figura 9: Proyección de las emisiones de PM ₁₀ para el año 2050 considerando distintos escenarios [30].	25
Figura 10: Factores de emisión PM _{2,5} y PM ₁₀ de desgaste de freno a través de método online y medición de filtros.	27
Figura 11: Factores de emisión PM _{2,5} y PM ₁₀ de desgaste de neumáticos a través de método online y medición de filtros.	28
Figura 12: Esquema de flujos dentro del montaje de freno de tambor [31].	29
Figura 13: Comparación de PM _{2,5} generado por desgaste de freno y material particulado de gases de escape.	31
Figura 14: Factores de emisión de partículas por desgaste de frenos (media $\pm$ desviación estándar) para vehículos de carga liviana en tres ciclos de conducción con distintos modos de frenado regenerativo: (a) emisiones de PM ₁₀ y (b) emisiones de PM _{2,5} [34].	33
Figura 15: Factores promedio de emisión de partículas por desgaste de frenos para vehículos de carga pesada bajo diferentes ciclos de prueba: (a) PM ₁₀ y (b) PM _{2,5} [34].	34
Figura 16: Montaje de sistema de muestreo a volumen constante (CVS) [36].	35
Figura 17: Mapa de freno regenerativo para simulación de PHEV y BEV.	37
Figura 18: Montaje experimental para la medición de partículas [37].	38
Figura 19: Gráfico de cajas de factores de emisión PM _{2,5} obtenidos a partir de los experimentos de los distintos laboratorios [37].	40
Figura 20: Diagrama de flujo de metodología PRISMA aplicada.	44
Figura 21: Diagrama de flujo de procesamiento de factores de emisión.	45
Figura 22: Clasificación geográfica de divisiones políticas de Colombia en función de parámetros vehiculares.	48
Figura 23: Diagrama de cajas de PM _{2,5} por desgaste de frenos para cada categoría vehicular.	53
Figura 24: Diagrama de cajas de PM _{2,5} por desgaste de neumáticos para cada categoría vehicular.	54
Figura 25: Diagrama de cajas de PM _{2,5} por desgaste de carreteras para cada categoría vehicular.	54

Figura 26: Emisiones de PM2,5 para cada proceso abrasivo en Chile (1990-2025).....	59
Figura 27: Emisiones de carbono negro para cada proceso abrasivo en Chile (1990-2025).	59
Figura 28: Gráfico comparativo de emisiones totales de PM2,5 abrasivas y de escape en Chile, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido (1990-2025).....	60
Figura 29: Gráfico comparativo de emisiones totales de carbono negro abrasivas y de escape en Chile, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido (1990-2025).....	61
Figura 30: Emisiones de PM2,5 estimadas para Colombia según cada fuente abrasiva entre los años 1990 y 2025.	64
Figura 31: Emisiones de BC estimadas de Colombia para cada fuente abrasiva entre los años 1990 y 2025.	65
Figura 32: Comparación entre PM2,5 totales de procesos abrasivos y emisiones por tubo de escape en Colombia a través de los años, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido (1990-2025).	66
Figura 33: Comparación entre BC totales de procesos abrasivos y emisiones por tubo de escape en Colombia, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido a través de los años (1990-2025).....	66
Figura 34: Comparación de emisiones PM2,5 por desgaste abrasivo entre Chile y Colombia.	68
Figura 35: Comparación de emisiones de carbono negro por desgaste abrasivo entre Chile y Colombia.	68

Lista de tablas

Tabla 1: Factores de emisión para desgaste por neumático y freno adaptado del artículo de EMEP (2024) [29].	17
Tabla 2: Factores de emisión para desgaste de carpeta rodante adaptado del artículo de EMEP (2024) [29].	17
Tabla 3: Fracción de PM _{2,5} para carbono negro según categoría vehicular interpretado de EMEP (2024) [29].	18
Tabla 4: Distribución másica del tamaño de partículas por desgaste de neumáticos [29].	19
Tabla 5: Distribución másica del tamaño de partículas por desgaste de frenos [29].	19
Tabla 6: Distribución másica del tamaño de partículas por desgaste de carreteras [29].	19
Tabla 7: Factor de emisión de TSP correspondientes para cada categoría vehicular proveniente de emisiones por desgaste de neumático, interpretado de EMEP (2024) [29].	20
Tabla 8: Factor de emisión de TSP correspondientes para cada categoría vehicular proveniente de emisiones por desgaste de freno, interpretado de EMEP (2024) [29].	20
Tabla 9: Factor de emisión de TSP correspondientes para cada categoría vehicular proveniente de emisiones por desgaste de carretera, interpretado de EMEP (2024) [29].	21
Tabla 10: Emisiones de PM _{2,5} por procesos abrasivos en Chile 2018-2020 [30].	22
Tabla 11: Emisiones de PM ₁₀ por procesos abrasivos en Chile 2018-2020 [30].	22
Tabla 12: Emisiones de freno para cada vehículo y ciclo de conducción [33].	31
Tabla 13: Emisiones promedio de PM ₁₀ y PM _{2,5} por cada vehículo de carga pesada.	34
Tabla 14: Emisiones de freno de vehículo de Segmento C en eje delantero y trasero.	36
Tabla 15: Emisiones de freno de eje delantero según nivel de electrificación.	37
Tabla 16: Factores de emisión PM _{2,5} obtenidos a partir del promedio de los resultados de varios laboratorios.	40
Tabla 17: Tabla comparativa interpretada de la equivalencia entre categoría vehiculares europeas y chilenas [40].	47
Tabla 18: Tabla comparativa interpretada de la equivalencia entre categoría vehiculares europeas y colombianas RUNT [41].	49
Tabla 19: Recopilación bibliográfica a partir de base de datos antigua y metodología PRISMA.	51
Tabla 20: Factores de emisión PM _{2,5} para categorías y fuentes abrasivas definidas con intervalo de confianza del 95%.	55
Tabla 21: Recopilación bibliográfica de fracciones de carbono negro para emisiones de freno, neumático y carretera.	56
Tabla 22: Fracciones de carbono negro con respecto a PM _{2,5} totales para cada categoría vehicular y fuente de desgaste abrasiva.	57
Tabla 23: Equivalencia de categorías entre base de datos de Chile y estimación TIER 2. ..	58
Tabla 24: Nivel de emisiones de PM _{2,5} y BC en función del tiempo para Chile.	58
Tabla 25: Proporciones de factor de emisión en función de tamaño vehicular.	62
Tabla 26: Factores de emisión en distintas fuentes abrasivas por categoría y tamaño vehicular (TIER 3).	63

Tabla 27: Equivalencia de categorías entre base de datos de Colombia y estimación TIER 2.	63
Tabla 28: Nivel de emisiones de PM _{2,5} y BC en función del tiempo para Colombia.	64
Tabla 29: Comparativa porcentual entre emisiones totales de PM _{2,5} y BC entre Chile y Colombia en intervalos de cinco años.	67

Introducción

El cambio climático es un tema que ha tomado severa importancia a partir de las últimas décadas debido a los efectos que se han generado a partir de la contaminación al medioambiente, ya sea derretimiento de glaciares, incendios forestales, y por, sobre todo, un incremento de la temperatura global. Existen distintas fuentes que contribuyen a este efecto negativo, pero gran parte de aquello se ve generada por las emisiones antropogénicas, o aquellas correspondientes al resultado de actividades humanas, donde se recalcan las fuentes fijas, que pueden ser las industrias, plantas de generación de energía, o refinerías, donde sus emisiones son descargadas al ambiente mediante ductos o chimeneas.

A estas se suman las fuentes móviles, que también representan un aporte significativo a la contaminación, especialmente los vehículos de carretera y de uso fuera de ruta. Sus emisiones provienen, en primer lugar, de los gases de escape generados por la combustión en el motor. Sin embargo, existe también otro tipo de emisiones menos visibles, pero igualmente importantes, que corresponden a las emisiones abrasivas, las cuales se originan por la interacción mecánica de roce entre distintas partes del vehículo y la superficie vial. En este caso, el desgaste de frenos, neumáticos y de la propia carretera liberan partículas al ambiente como resultado de la fricción constante.

El material desprendido por estos procesos se considera un contaminante atmosférico, ya que, al encontrarse en el ambiente en concentraciones significativas, puede afectar negativamente a la atmósfera, calidad de aire, y la salud de las personas. Uno de estos contaminantes corresponde al material particulado (MP), el cual se clasifica de acuerdo con su diámetro aerodinámico, el cual se entiende como el tamaño equivalente de una esfera que se comporta, al moverse y sedimentarse en el aire, de la misma forma que la partícula real. Este criterio de clasificación permite diferenciar las categorías más relevantes: PM₁₀, partículas con un diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros, y PM_{2,5}, aquellas con un diámetro menor a 2,5 micrómetros. Estas partículas, mientras más finas, mayor es su penetración al sistema respiratorio y los efectos que generan en el cuerpo humano son más dañinos a largo plazo. Dentro de la categoría de PM_{2,5}, está el carbono negro, que corresponde a un material con alta capacidad de absorber radiación y se genera a partir de la combustión incompleta, pero también se emite en cantidades significativas en las emisiones abrasivas, ya que este material se ocupa para la fabricación de neumáticos y además se utiliza como material aditivo para ciertos metales que componen al vehículo.

El objetivo general corresponde a realizar una estimación de emisiones de PM_{2,5} y carbono negro generadas por abrasión en vehículos de carretera en Chile y Colombia, y se busca que esta memoria aporte conocimientos en cuanto a las emisiones vehiculares y contribuir con literatura en torno a este tema, el cual es escaso en comparación con la información disponible de emisiones por gases de escape, especialmente a nivel Sudamérica. Específicamente, esta memoria contribuye con información cuantitativa poco disponible en ambos países, lo cual resulta crucial para entender la dimensión y la magnitud que tienen estas fuentes abrasivas dentro de los inventarios de emisiones.

En segundo lugar, el trabajo aporta con información para el fortalecimiento de la gestión ambiental y las políticas públicas, ya que los resultados obtenidos pueden servir material para mejorar los inventarios nacionales de emisiones y priorizar acciones que contemplen tanto las fuentes de emisiones tradicionales como aquellas menos visibles, las cuales se estudian en este trabajo. Asimismo, al aportar simultáneamente con estimaciones de PM_{2,5} y carbono negro, la investigación no solo se vincula con la problemática de la salud pública, dada la toxicidad y capacidad de penetración de estas partículas en el sistema respiratorio humano, sino también con el desafío global del cambio climático, debido al rol que tiene el carbono negro como contaminante climático de vida corta.

Para lograr realizar las estimaciones de los contaminantes mencionados, se realiza una búsqueda de la literatura disponible en cuanto a las emisiones generadas por procesos abrasivos, con el fin de extraer datos cuantitativos que se puedan utilizar para la estimación final y poder unificarlos a una base de datos existente con el fin de actualizar su información con estudios recientes. A partir de los valores extraídos de la literatura, se determinan factores de emisión para cada tipo de vehículo y contaminante, los cuales determinan la cantidad de emisiones generadas en peso por cada kilómetro recorrido del tipo de vehículo, y se obtienen a partir de la interpretación de la información de la literatura disponible. Un dato adicional que se requiere para obtener la estimación son los datos de kilometraje recorrido por cada categoría vehicular y la cantidad de vehículos actuales para cada categoría, tanto para Chile como Colombia, el cual se obtiene a partir de una base de datos gubernamental, y mediante esos datos y los factores de emisión, se estiman las emisiones totales de PM_{2,5} y carbono negro con una metodología top-down.

Este trabajo se estructura en primer lugar a partir de la definición de los objetivos generales y específicos, con el propósito de orientar y facilitar el cumplimiento progresivo de las metas que, en conjunto, permiten alcanzar el resultado final esperado. Posteriormente, se desarrolla un marco teórico que aborda de manera detallada el concepto de emisiones, sus distintas clasificaciones según el diámetro de partícula, los efectos que pueden provocar a largo plazo en la salud y en el medioambiente, así como las principales fuentes que las generan. Dentro del marco teórico, se incluye el tema de las emisiones generadas por procesos abrasivos en vehículos, mencionando individualmente a las emisiones por desgaste de frenos, neumáticos y carretera, y los mecanismos que interactúan por fricción para generar el material particulado, enfatizando en el efecto que tienen distintos parámetros en la cantidad generada, ya sea los materiales de los pares de fricción, condiciones ambientales y la forma de conducción. Además, se incluye una sección que menciona la transición eléctrica, o el cambio gradual que se está realizando para cambiar los autos a gasolina por vehículos eléctricos, mencionando el efecto que tendría en tanto las emisiones por gases de escape como por procesos abrasivos, recalcando ventajas y desventajas de la transición en torno a esos temas. El cierre de dicho capítulo se realiza mediante el estudio de literatura correspondiente al primer objetivo, donde se busca comprender los estudios realizados desde los años 2023-2025, los montajes experimentales y los resultados obtenidos a partir de aquello.

El trabajo sigue con una descripción de las metodologías ocupadas para la búsqueda inicial, la implementación de la metodología PRISMA para la obtención de artículos científicos, y procedimientos utilizados para la estimación de factores de emisión, cálculo de actividades vehiculares y estimación final de las emisiones de tanto PM_{2,5} como carbono negro.

En la sección de resultados se presentan los hallazgos cuantitativos derivados del análisis y metodologías descritas, acompañados de gráficos y tablas que permiten visualizar y comparar la información obtenida a partir de la literatura revisada. Posteriormente, se exponen las consideraciones para las bases de datos gubernamentales, donde se asocian sus valores a las categorías vehiculares seleccionadas para la estimación, tanto para los registros de Chile como de Colombia. Finalmente, se realiza una estimación en peso de las emisiones de PM_{2,5} y carbono negro generadas en ambos países, junto con una comparación entre los resultados obtenidos para ambos casos, ofreciendo así una visión cuantitativa y comparativa de la magnitud del problema en contextos latinoamericanos.

Objetivo

El objetivo general se asocia a estimar las emisiones de MP2,5 y carbono negro por desgaste en vehículos de carretera y en Chile y Colombia. Para cumplir el objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar la bibliografía en torno a las emisiones por desgaste abrasivo en vehículos.
2. Determinar factores de emisión para cada tipo de vehículo y emisión en base a revisión de literatura internacional.
3. Evaluar la cantidad de vehículos terrestres y su actividad por categoría vehicular en Chile y Colombia.
4. Calcular las emisiones por desgaste en vehículos de carretera en Chile y Colombia en base a los datos estimados.

1. Marco Teórico

Las emisiones vehiculares representan una de las principales fuentes de contaminación atmosférica en entornos urbanos, que presentan efectos adversos, tanto en la salud humana como en el medio ambiente. Estas emisiones incluyen tanto productos de la combustión incompleta, ya sea monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC), como compuestos generados incluso en condiciones de combustión óptima, tales como óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de carbono (CO₂). Además, los motores vehiculares liberan material particulado (MP), y otros contaminantes secundarios derivados de reacciones atmosféricas.

El material particulado es uno de los contaminantes más críticos emitidos por los gases de escape de los vehículos. Estas partículas se componen de una mezcla compleja de sólidos y líquidos, incluyendo carbono elemental, compuestos orgánicos, sulfatos, nitratos, metales pesados y material condensado de hidrocarburos. Según su diámetro aerodinámico, se pueden clasificar en PM₁₀, que corresponde a todo el conjunto de partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros [μm], o PM_{2,5}, que pertenece a la categoría de partículas con diámetro menor o igual a 2,5 micrómetros. Las PM₁₀ pueden penetrar en el sistema respiratorio superior, generando consecuencias graves, especialmente en infantes, donde se observa un incremento en la mortalidad infantil, y contribuciones a la disminución de su peso de nacimiento [1]; mientras que las PM_{2,5} y las partículas ultrafinas son más peligrosas, ya que alcanzan los alvéolos pulmonares e incluso pueden ingresar al torrente sanguíneo, asociándose a enfermedades cardiopulmonares, cáncer y mortalidad prematura.

Dentro de la categoría del PM_{2,5}, existe un componente denominado carbono negro u hollín, el cual también corresponde a una emisión vehicular y se produce principalmente debido a la combustión incompleta de combustibles fósiles. Es importante considerar el desarrollo de tecnologías y normas ambientales para disminuir este tipo de contaminante, ya que el carbono negro absorbe la radiación solar de manera efectiva, calentando la atmósfera y resultando en consecuencias a largo plazo, ya sea derretimiento de glaciares y efectos negativos en la salud humana en general.

Reconociendo los efectos que tiene el material particulado sobre el medioambiente y la salud de las personas, cabe destacar que los gases de escape no son las únicas fuentes de emisiones de este contaminante, sino que también se pueden emitir estos a través de procesos abrasivos del vehículo. Las emisiones de material particulado generadas por estos procesos abrasivos en vehículos corresponden a una fuente de contaminante significativa, aunque menos estudiada que las emisiones por escape. Estas partículas se originan principalmente por el desgaste de componentes mecánicos como frenos, neumáticos, y por la superficie de la carretera o carpeta rodante, donde este último desprende material a través de la interacción física con el neumático.

1.1. Frenos

El freno corresponde a un elemento del vehículo que cumple la función de absorber la energía cinética que posee el vehículo en dicho instante, donde, mediante su accionamiento, esa energía cinética se convierte en energía térmica gracias a las fuerzas de fricción realizadas [2]. La energía cinética del vehículo es dependiente de su peso y de la capacidad del motor para entregarle potencia, resultando en el avance del motor a una cierta velocidad y aceleración. Entre los sistemas de freno principales se encuentra el freno de disco y de tambor. El diagrama de un sistema de freno de discos se puede observar en la Figura 1.

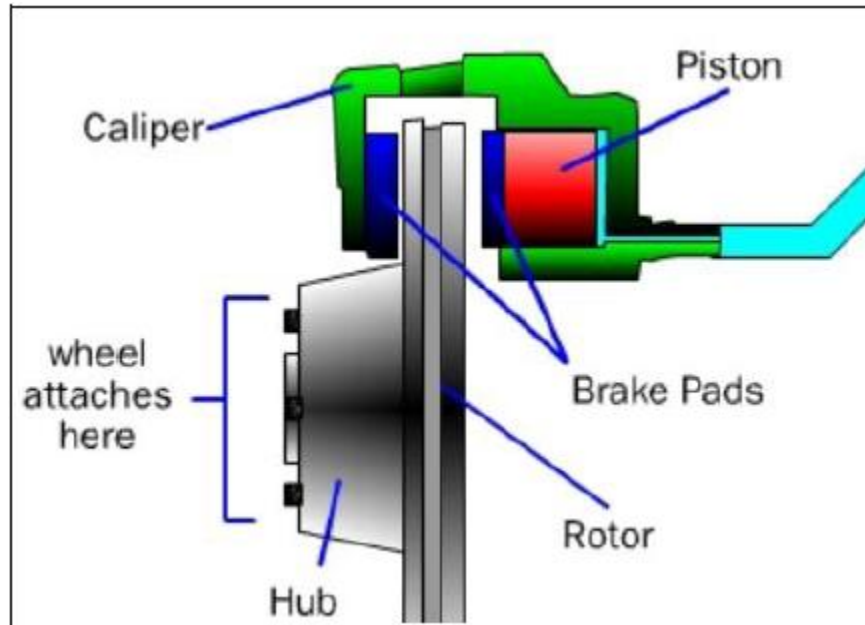


Figura 1: Componentes de un sistema de frenado por disco [3].

A partir de la Figura 1, se puede rescatar que uno de los componentes principales es el rotor, el cual es acoplado a la rueda del motor a través del cubo del rotor (Hub) y tiene la función de transmitir la potencia de frenado hacia el vehículo. La mordaza de freno (Caliper), tiene la función de encasillar al pistón, y a las pastillas de freno (Brake pads), aseguran que exista contacto entre la superficie de ambos elementos.

El funcionamiento de los sistemas de frenos de disco modernos se basa en un mecanismo hidromecánico. Cuando se acciona el pedal de freno del vehículo, se genera presión hidráulica en el cilindro maestro, que se transmite a través del circuito hidráulico hasta los pistones alojados en las mordazas de freno. Estos pistones desplazan las pastillas de freno, contra las superficies del disco rotor [4]. El contacto entre estos componentes genera una fuerza de fricción, que tal y como fue mencionado, convierte la energía cinética del vehículo en energía térmica, permitiendo la desaceleración controlada del vehículo. A partir del principio de funcionamiento se puede desprender que la interacción principal ocurrente para el frenado del vehículo es entre las pastillas de freno y el rotor. Para que haya una interacción eficiente entre ambos cuerpos, cada uno debe contar con una composición material que permita una vida útil prolongada.

El material más utilizado para los rotores de freno es la fundición gris, debido a principalmente los beneficios que entrega en cuanto a una buena maquinabilidad, alta conductividad térmica, capacidad calorífica, resistencia al fading (pérdida de eficacia por sobrecalentamiento) y bajo costo. En cambio, las pastillas de freno están compuestas por una variedad de materiales, ya que deben cumplir con muchos requisitos, como no ser dañino al medioambiente, tener alto coeficiente de fricción, bajo desgaste ante la fricción y el calor, y todos estos a un bajo costo. Las pastillas de freno incorporan aglutinantes, fibras de refuerzo y aditivos de fricción para equilibrar rendimiento y durabilidad. Los aglutinantes (como resinas fenólicas) proporcionan estructura cohesiva, mientras las fibras de refuerzo (aramida, acero) mejoran la resistencia mecánica y térmica. A esta mezcla de componentes se le agregan aditivos de fricción, los cuales se dividen en dos categorías: lubricantes y abrasivos. Los lubricantes (grafito, sulfuros metálicos) estabilizan el coeficiente de fricción a altas temperaturas, mientras los abrasivos (óxidos metálicos, silicatos) aumentan la fricción, pero elevan el desgaste del disco, eliminando óxidos de hierro y películas superficiales no deseadas [5].

Los elementos que componen al sistema de frenado por tambor se pueden visualizar en la Figura 2:

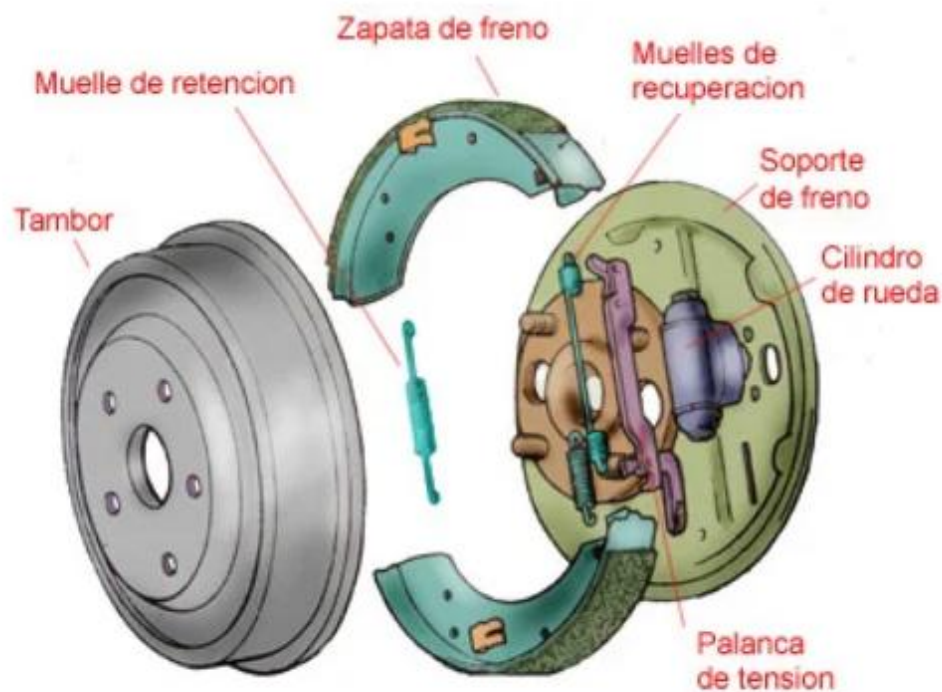


Figura 2: Diagrama de componentes de un freno de tambor [6].

En cuanto al funcionamiento del freno de tambor, el frenado ocurre mediante la fricción generada al forzar las zapatas de freno contra la superficie interior del tambor, la cual se

mueve solidaria a la rueda. Al accionar el freno, la palanca de tensión empuja las zapatas hacia fuera, haciendo que rocen contra el tambor giratorio; esta fricción convierte la energía cinética en calor, frenando la rueda. Al soltar el pedal, los muelles de recuperación retraen las zapatas hacia su posición central, separándolas del tambor y permitiendo que la rueda gire libremente de nuevo.

Entre los componentes principales que interactúan para generar la fuerza de fricción se encuentra el tambor, que está compuesto principalmente por fundición gris con grafito esférico, material que se ha impuesto por su elevada resistencia al desgaste, menor costo de fabricación y buena absorción del calor producido por el rozamiento en el frenado, y las zapatas de freno, las cuales están formadas por dos chapas de acero soldadas en forma de medialuna y recubiertas en su zona exterior con un forro de freno, el cual lleva una composición similar a las pastillas de freno, proporcionándole al freno propiedades de fricción [7].

El uso continuo del sistema de frenado genera un desgaste progresivo tanto en los elementos giratorios (discos o tambores) como en los componentes de fricción (pastillas o zapatas), lo que hace necesario realizar revisiones periódicas para garantizar la seguridad y eficacia del frenado. Este desgaste natural por fricción requiere el reemplazo oportuno de pastillas o zapatas cuando alcanzan su límite de grosor, así como la inspección del estado de los discos, tambores y líquido de frenos, siguiendo tanto las recomendaciones del fabricante como los intervalos de mantenimiento establecidos para el vehículo. Este nivel de desgaste depende de la frecuencia de uso del frenado, la fuerza de frenado, y el tipo de vehículo que se esté utilizando.

Este desgaste resulta en emisiones de material particulado, de tanto PM_{2,5} como PM₁₀, que pueden resultar a ser dañinos, ya que el tipo de material emitido va a depender de los elementos que componen las piezas interactuantes en el sistema de frenado de disco y tambor, por lo que una de las características de las pastillas de freno es que utiliza materiales no dañinos para el medioambiente. Es importante recalcar que no todas las partículas de desgaste generadas durante el frenado se liberan al aire, sino que un porcentaje considerable suele depositarse en la superficie de la carretera o adherirse al vehículo, sin que su destino final sea del todo claro [8].

Desde un segundo estudio realizado, se analiza la distribución elemental de emisiones de frenado en un sitio de carretera durante el invierno y el verano, rescatándose los siguientes datos:

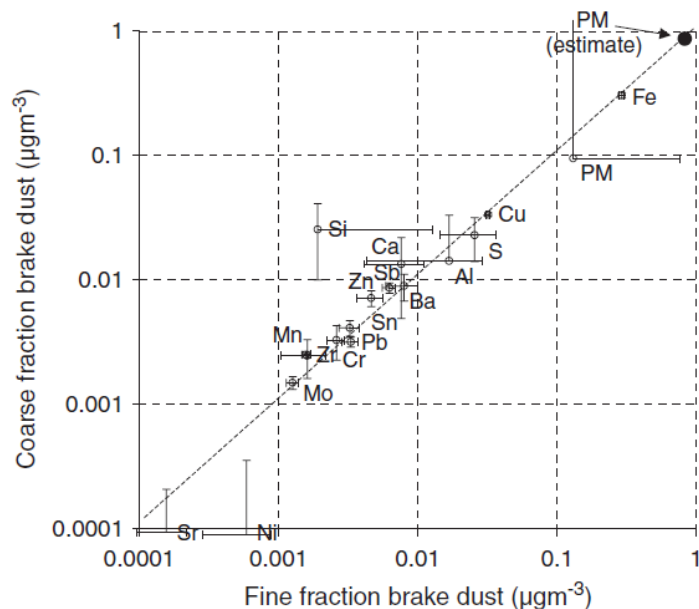


Figura 3: Distribución elemental de emisiones de freno [9].

A partir de los títulos de eje de la Figura 3, se observan términos como “Fine fraction brake dust”, que aluden a las emisiones de PM_{2,5}, mientras que “coarse fraction brake dust” refiere a partículas de diámetro entre 2,5 y 10 micrómetros [9]. Se observa la mayor concentración de emisiones en elementos como hierro (Fe), cobre (Cu), silicio (Si), antimonio (Sb), calcio (Ca), entre otros. Se puede interpretar que hay una directa relación entre el perfil elemental de las emisiones de freno del estudio con los componentes de fricción de freno, ejemplificando el hierro, el cual es el elemento principal de los rotores, o el antimonio que corresponde a un elemento que se usa como lubricante en pastillas de freno.

El desgaste de frenos es una fuente importante de material particulado, determinada por el diseño del sistema, la composición de las pastillas y los discos, y las condiciones de operación. La fricción propia del frenado genera emisiones relevantes de PM_{2,5}, especialmente en entornos urbanos. En general, mientras mayor es la potencia de frenado requerida, mayor es la cantidad de partículas liberadas; por ello, en vehículos de mayor peso se espera un nivel de emisión más elevado.

1.2. Neumáticos

Los neumáticos son componentes esenciales de un vehículo que están diseñados para soportar el peso del vehículo, absorber los impactos de la carretera, transmitir tracción y torque del motor a la superficie de rodadura [10]. La propiedad física que predomina en el análisis de los neumáticos es el coeficiente de fricción, que alude a la adherencia al camino o resistencia al deslizamiento del neumático sobre la superficie de la carretera, debido a una fuerza retardante generada en el área de contacto entre el neumático y el suelo. En términos matemáticos, corresponde a la relación entre la fuerza de deslizamiento necesaria para mover

constantemente un cuerpo sólido sobre una superficie horizontal y la reacción normal que soporta el peso del cuerpo sobre dicha superficie [2].

A partir de la interacción entre los neumáticos del vehículo y la carpeta asfáltica, se produce un desprendimiento de material o desgaste de tanto partículas del neumático como de la carretera. Para el caso de los neumáticos, un neumático nuevo para un vehículo de pasajeros pierde entre 1 y 1,5 [kg] de peso durante una vida útil aproximada de 50.000 [km]. Este desgaste depende de muchos factores, donde se destaca el material de neumático, temperatura de la superficie neumática, velocidad de vehículo y nivel de inflado [11]. También afectan las condiciones de la carretera, que puede ser la humedad y textura del pavimento [12].

Generalmente, los neumáticos de automóviles de pasajeros están compuestos por un 41-48% de caucho, un 22-28% de carbono negro, un 13-16% de metal, un 4-6% de textiles y un 10-12% de aditivos [13]. El caucho se compone de una mezcla de caucho natural y sintético, proporcionando una flexibilidad al compuesto y resistencia al desgaste; el carbono negro entrega resistencia mecánica y protección contra los rayos UV, además encargándose de darle el color negro característico al neumáticos; el acero sirve para la fijación a la rueda del vehículo; los textiles sirven como material de refuerzo estructural, la cual contribuye al incremento de durabilidad y rendimiento del neumático [14]; y los aditivos proveen una mejora adicional de durabilidad y rendimiento del caucho, pudiendo estar en forma de antioxidantes, agentes vulcanizantes o agentes antienviejecimiento [15]. La combinación de estos materiales busca resolver el problema del “triángulo mágico”, el cual alude a las 3 propiedades que buscan equilibrar las composiciones del neumático, que viene siendo agarre, durabilidad y resistencia a la rodadura [16]. La composición material toma un papel crucial en este problema, por ejemplo, un incremento en el agarre del neumático resulta en un aumento consecuente de la resistencia a la rodadura, pero en un decremento de la durabilidad, ya que incrementaría la fricción entre el neumático y la carretera, y por consecuencia, el desgaste generado.

A partir del contacto entre el neumático vehicular y la carpeta asfáltica, parte de la energía utilizada para desplazar el vehículo se disipa como energía en forma de calor, contribuyendo directamente a la temperatura del neumático. A temperaturas superiores a aproximadamente 93 [°C], un neumático es más susceptible a fallos por impactos, cortes y fatiga, mientras que, a temperaturas superiores a 132 [°C], el caucho sufre separaciones y grietas. La generación de calor en un neumático depende del peso que debe soportar, velocidad del vehículo y la temperatura del ambiente [17], donde esta última, al ser menor, mejor refrigera el neumático de manera natural.

Tal y como se menciona, la velocidad influye en la temperatura del neumático, donde se conoce que la energía es proporcional a la velocidad al cuadrado, o sea, un incremento en la velocidad afecta directamente en la cantidad de energía que se disipa en el vehículo en forma de calor, el cual es absorbido en gran parte por el neumático. A continuación, se puede observar en la Figura 4 la relación que existe entre el desgaste y la velocidad vehicular.

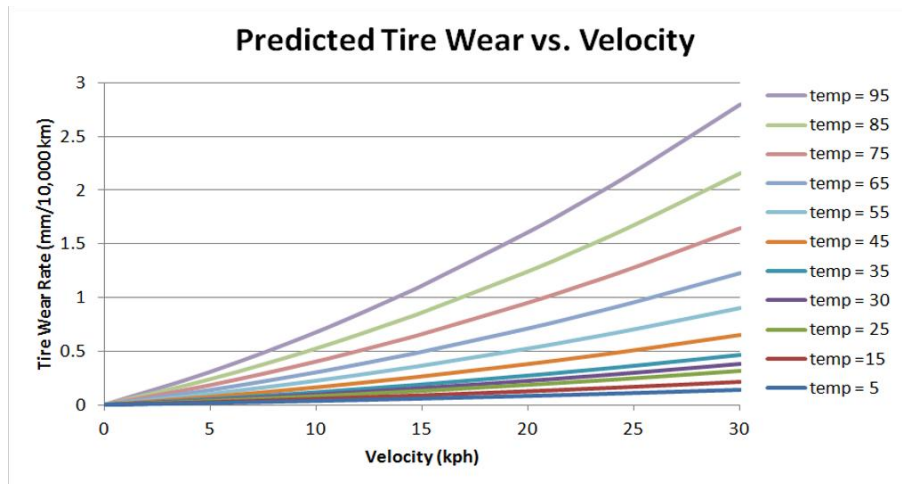


Figura 4: Modelo de tasa de desgaste de neumático en función de la velocidad [17].

A partir de la Figura 4, se puede ver que la tasa del desgaste observa un incremento a medida que aumenta la velocidad del vehículo, además de que, a mayor temperatura de neumático, más pronunciada es la curva de desgaste, respaldando lo mencionado anteriormente.

Una correcta presión de inflado también es clave para asegurar el funcionamiento de este componente bajo las condiciones de operación para la cual fue diseñada. Si la presión del neumático es muy alta, la tracción queda reducida debido a la disminución de la superficie de contacto del neumático con la carretera, mientras que, si la presión es baja, la superficie de la banda de rodadura o la superficie exterior del neumático, tiene mayor área de contacto [18], haciendo que los bordes del neumático empiecen a realizar contacto además de la superficie central, la cual debe ser la única sección en contacto debido a su capacidad de agarre y control bajo distintas condiciones de superficie, lograda a través de su distintivo patrón de diseño. Este desgaste en las secciones laterales, debido a que no están diseñadas para estar en contacto con la superficie asfáltica, aumentan el desgaste total que sufre el neumático, además resultando en deformidades que resultan en imprecisiones del vehículo al realizar cambios de dirección [19].

Además, se tiene el factor de textura del pavimento, el cual juega un papel fundamental en el comportamiento de los neumáticos, especialmente en condiciones de humedad. Cuando la carretera está mojada, una superficie rugosa con irregularidades permite que el agua se disperse eficientemente a través de ella, facilitando el contacto directo entre el neumático y la carpeta asfáltica. Esto mejora significativamente la adherencia y reduce el deslizamiento, lo que se traduce en un desgaste más uniforme de la banda de rodadura. En caso contrario, en pavimentos lisos, el agua forma una capa homogénea que dificulta su desplazamiento, aumentando el riesgo de pérdida de tracción y provocando un desgaste irregular en el neumático [2].

El desgaste de neumáticos depende fuertemente del material, la temperatura, la velocidad, presión de inflado y condiciones de carretera. Este proceso aporta cantidades importantes de partículas, especialmente a altas velocidades y bajo condiciones de manejo exigentes.

1.3. Carretera

Las carreteras constituyen un elemento fundamental en los sistemas de transporte vehicular, ya que proporcionan la superficie de rodadura para los desplazamientos vehiculares. Como se mencionó previamente, la interacción entre el neumático y el pavimento genera fuerzas de fricción que provocan el desgaste progresivo de la banda de rodadura. Sin embargo, este fenómeno no es unilateral, ya que el movimiento vehicular también induce desgaste sobre el pavimento con una velocidad relativa a este, lo que ocasiona el desprendimiento gradual de partículas de la superficie de la carretera. Este proceso de deterioro de carretera se genera por factores principales como la composición material, el tráfico vehicular y las condiciones climáticas, donde para este último factor no se han rescatado estudios que cuantifiquen su efecto [20].

El asfalto, que corresponde al compuesto por el cual se forma la carretera, depende de materiales como el betún y otros agregados [21]. El bitumen o betún, es un material viscoso derivado del petróleo que actúa como agente aglomerante en la construcción de carreteras. Su composición química, principalmente hidrocarburos complejos, le confiere propiedades únicas de adhesividad y resistencia al flujo plástico. La calidad del bitumen está determinada por características como su penetración, viscosidad y punto de ablandamiento, parámetros que influyen directamente en su comportamiento bajo diferentes condiciones climáticas y de carga [22]. Los agregados, los cuales son de características pétreas normalmente, son componentes fundamentales en la composición del asfalto, donde su naturaleza mineral determina directamente la resistencia al desgaste del pavimento. Estudios demuestran que agregados duros como el granito y basalto muestran superior desempeño, reduciendo la pérdida de textura superficial frente a materiales calcáreos, los cuales se degradan con rapidez por abrasión, especialmente en condiciones húmedas. La dureza, forma angular y adhesividad de estos agregados no solo minimizan el pulido acelerado causado por el tráfico, sino que también disminuyen la generación de partículas contaminantes y mejoran la fricción superficial, lo cual es clave para la seguridad vial [23].

Un estudio realizado para ver el desgaste de carretera producto de vehículos de carga pesada, dominado por vehículos de Clase 9 y Clase 5, muestra que el flujo de vehículos pesados acelera el deterioro del pavimento. Las cargas pesadas generan deformaciones profundas y permanentes (ahuellamiento), especialmente en pavimentos con bases delgadas o materiales deficientes, como se observó en Texas, donde altos volúmenes anuales de camiones exacerbaban este problema, mientras que, reducciones drásticas de tráfico, como en Arizona en 2003, mostraron disminuciones notables en este daño [20]. Esto evidencia una correlación directa entre el volumen de tráfico y el nivel de material particulado emitido como resultado del daño al pavimento.

Para evaluar el impacto del agua en el compuesto asfáltico, un estudio experimental realizado en probetas de asfalto con distintos contenidos de agua demuestra que la humedad reduce drásticamente la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas (tipo MDC-2), acelerando el deterioro de pavimentos. Se observa que, a mayor contenido de agua, disminuye la vida útil, evidenciando que las probetas saturadas, o sea de 100% de humedad relativa, resisten hasta un 24% menos de ciclos que las probetas con 8% de humedad relativa, debido a que el agua genera presiones en los poros y fisuras durante el paso de vehículos, causando erosión interna, oxidación del asfalto y pérdida de cohesión entre los agregados que conforman el compuesto asfáltico [24].

Se observa que el deterioro de la carretera, además de depender de su composición material, se encuentra directamente relacionado con el nivel de tráfico del sector, particularmente en vías con alto flujo de vehículos pesados y avenidas con alta densidad de tráfico.

1.4. Transición eléctrica

Las medidas tomadas por los distintos gobiernos hacia la implementación de vehículos eléctricos es un factor muy importante por considerar. Un vehículo eléctrico, debido a su principio de funcionamiento, implica que las emisiones de escape van a ser nulas, lo cual resulta excelente en términos medioambientales, pero un factor importante a considerar es el peso vehicular, que, debido a la incorporación de una batería como tren motriz, que tienen una capacidad promedio de 50 [kWh] [25], implica un efecto curioso en las emisiones por procesos abrasivos.

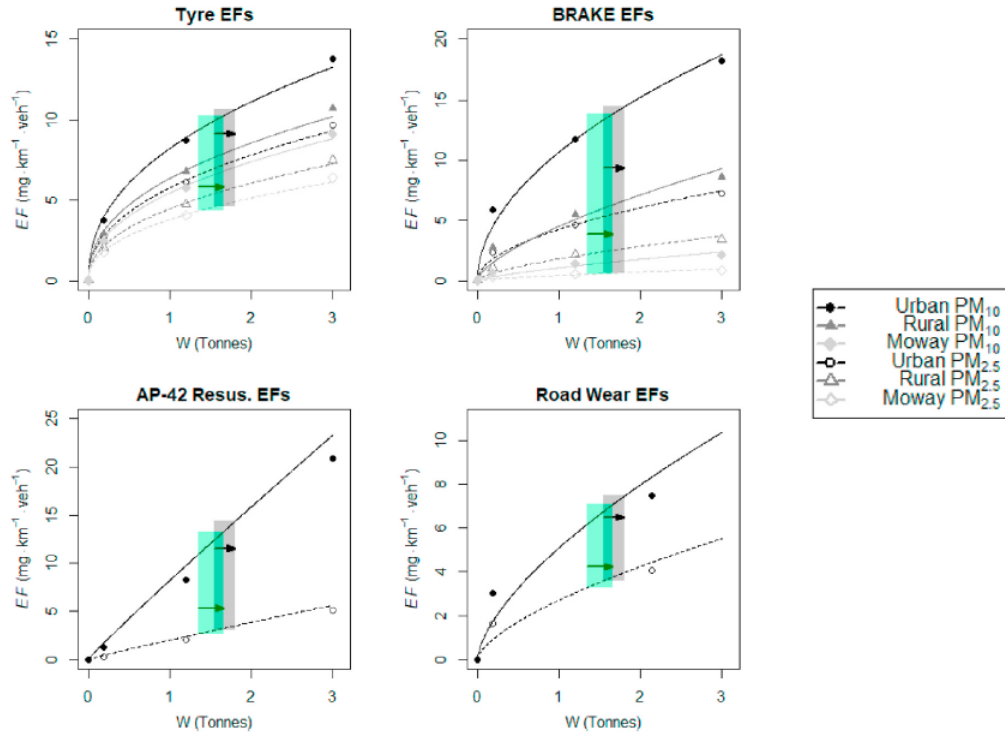


Figura 5: Regresión de factores de emisión por procesos abrasivos en función de la masa vehicular [26].

En base a la Figura 5, se puede observar cómo incrementa el factor de emisión, o la cantidad de material particulado emitido por kilómetro vehicular viajado, para cada una de las fuentes abrasivas de material particulado, apuntando hacia la conclusión de que en los vehículos eléctricos debería presentarse una mayor cantidad de estas emisiones. Estas fuentes abrasivas ya representan más del 90% de las emisiones de PM₁₀ y el 85% de las de PM_{2.5}, lo que limita el beneficio ambiental esperado de la electrificación vehicular [27].

Un caso particular se observa en el fenómeno de desgaste de frenos en los vehículos eléctricos. De acuerdo con la Figura 5, cabría esperar que sus emisiones fuesen superiores a las de los vehículos con motor de combustión interna, debido a su mayor peso. Sin embargo, este efecto se ve compensado por la incorporación del sistema de frenado regenerativo.

El sistema de frenado regenerativo en los vehículos eléctricos permite recuperar parte de la energía cinética del vehículo durante la desaceleración, transformándola en energía eléctrica que luego se almacena en la batería. Este proceso reduce la carga del sistema de frenos mecánicos, mejorando la eficiencia energética del vehículo y prolongando la vida útil de los componentes involucrados en el sistema de frenado mecánico, que corresponden principalmente al disco y las pastillas de freno. A pesar de ser un sistema muy conveniente, tiene sus limitaciones, las cuales radican principalmente en su dependencia de las condiciones de conducción. Su aporte es reducido a bajas velocidades, por la capacidad del sistema eléctrico, o cuando la batería está completamente cargada, lo que obliga a la utilización del par de fricción para realizar los frenados, indicando que este sistema se utiliza de manera

complementaria al frenado mecánico y no lo puede reemplazar completamente. A pesar de las limitaciones mencionadas, al fin y al cabo, este sistema de aprovechamiento energético disminuye la carga total del freno mecánico en comparación con los vehículos de combustión interna, lo cual significa que las emisiones totales por el desgaste de frenos disminuyen en comparación [28].

Tomando en cuenta estas limitaciones del vehículo eléctrico, si se comparan los niveles de partículas emitidos, se observa que los vehículos eléctricos generan cantidades de PM10 que son prácticamente equivalentes a las de los vehículos de combustión modernos, mientras que la reducción en PM2,5 alcanza entre un 1% y 3% [27], ya que, a pesar de generar menores emisiones de freno, al pesar más que el vehículo a motor de combustión interna convencional, genera un mayor desgaste en los neumáticos y la carretera. Por ello, la flota de vehículos eléctricos llega a ser una variable interesante de estudio para poder comparar sus emisiones de material particulado según los distintos procesos abrasivos frente a los vehículos con motor de combustión interna.

La transición hacia vehículos eléctricos reduce las emisiones por escape, pero no elimina las emisiones de desgaste abrasivo, no solucionando el problema de las emisiones de material particulado en su totalidad. Aunque los vehículos eléctricos tienen un peso mayor que los vehículos de combustión convencional, su sistema de frenado regenerativo reduce significativamente la carga sobre los frenos durante la conducción, emitiendo menos material particulado que el vehículo convencional. En contraste, las emisiones asociadas al desgaste de neumáticos y de la carretera tienden a aumentar, ya que dependen directamente del peso del vehículo.

1.5. Estudio de literatura

Con el fin de poder realizar una estimación de la cantidad de material particulado emitido, es necesario hacer el estudio de la literatura existente y reciente del tema, con el fin de identificar estimaciones de material particulado, metodologías de cálculo, y consideraciones adicionales para el desarrollo de la estimación.

1.5.1. EMEP (2024)

Este reporte realizado por el EMEP entrega una descripción de las emisiones por procesos abrasivos. Para el caso del desgaste por neumático, se hace referencia a la composición química de su material, la tendencia de sus emisiones dependiendo del tipo de vehículo y mencionando la pérdida de material neumático que se presenta a lo largo de la vida útil de estas y dependiendo del tipo de vehículo a evaluar.

Para el desgaste por freno, entrega el principio de funcionamiento del sistema de frenado común, mencionando los componentes principales y la interacción que genera la fricción que resulta en el desgaste y la posterior emisión del material particulado proveniente del frenado. Presenta datos externos del cambio en los valores del factor de desgaste para los frenos dependiendo del tamaño del vehículo, tamaño de frenos, severidad de uso del freno y peso de vehículo.

En el caso de la carpeta rodante, se destaca el efecto en las emisiones por desgaste en la carretera cuando se usan neumáticos con o sin clavos. Recalca que, en los neumáticos sin clavos, que corresponden al caso común de tipo de neumático en carretera, cuando hay alta densidad de tráfico, la gran mayoría de las emisiones por desgaste totales son de carretera. En cuanto a la carretera en sí, menciona cómo la composición del asfalto utilizado para hacer la carretera afecta en las emisiones por su desgaste.

Para estimar las emisiones de los vehículos de carretera, como primera aproximación utilizan la metodología Tier 1, la cual permite calcular partículas suspendidas, PM_{2,5} y PM₁₀ a través de la siguiente fórmula:

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{i,j}$$

Donde TE equivale a las emisiones totales de TSP (Partículas totales suspendidas), PM₁₀ o PM_{2.5} para el período de tiempo y límite espacial definidos [g], N_j corresponde al número de vehículos en la categoría j dentro del límite espacial definido, M_j es el kilometraje promedio recorrido por vehículo en la categoría j durante el período de tiempo definido [km], y $EF_{i,j}$ es el factor de emisión de masa para el contaminante i y la categoría de vehículo j [g/km]. Los índices son: i = TSP, PM₁₀, PM_{2.5}; j = categoría de vehículo (vehículo de dos ruedas, automóvil de pasajeros, camión ligero, pesado).

A continuación, se muestran los factores de emisiones propuestos para cada tipo de vehículo, clasificando los distintos factores según el contaminante:

Tabla 1: Factores de emisión para desgaste por neumático y freno adaptado del artículo de EMEP (2024) [29].

Categoría vehicular	Contaminante	Factor de emisión vehicular [mg/km]
Motocicletas	TSP	0,0083
	PM10	0,0064
	PM2,5	0,0034
Vehículos pasajeros	TSP	0,0229
	PM10	0,0184
	PM2,5	0,0093
Camiones de carga liviana	TSP	0,03427
	PM10	0,0271
	PM2,5	0,0139
Camiones de carga pesada	TSP	0,0777
	PM10	0,059
	PM2,5	0,0316

A partir de la Tabla 1 se puede observar que la propuesta de factores de emisión se realiza para vehículos pasajeros, motocicletas, vehículos ligeros y pesados, evaluando las emisiones de PM2,5 PM10 y TSP para cada tipología vehicular. Cabe destacar que la propuesta de factores realizados por el EMEP según la tabla, combinan los desgastes de neumático y freno.

Además, en el estudio se desarrolla una tabla utilizando la misma categorización de contaminantes, en este caso, para las emisiones abrasivas por carretera, la cual se muestra a continuación:

Tabla 2: Factores de emisión para desgaste de carpeta rodante adaptado del artículo de EMEP (2024) [29].

Categoría vehicular	Contaminante	Factor de emisión vehicular [mg/km]
Motocicletas	TSP	0,006
	PM10	0,003
	PM2,5	0,0016
Vehículos pasajeros	TSP	0,015
	PM10	0,0075
	PM2,5	0,0041
Camiones de carga liviana	TSP	0,021
	PM10	0,0105
	PM2,5	0,0057
Camiones de carga pesada	TSP	0,076
	PM10	0,038
	PM2,5	0,0205

Dentro de este reporte también se mencionan las proporciones de PM_{2,5} que ocupa el carbono negro para cada una de las fuentes de desgaste abrasivo por categoría vehicular. Donde sus valores se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3: Fracción de PM_{2,5} para carbono negro según categoría vehicular interpretado de EMEP (2024) [29].

Categoría vehicular	Fracción BC desgaste de neumático/Freno	Fracción BC desgaste de carretera
Vehículos de dos ruedas	0,12	0,0106
Vehículos pasajeros	0,10	0,0106
Vehículos comerciales livianos	0,10	0,0106
Vehículos de carga pesada	0,10	0,0106

Para una estimación más aproximada, EMEP continúa su análisis con el desarrollo de la metodología Tier 2 para la estimación de emisiones, donde su fórmula, además de usar los factores del Tier 1, agrega una variable que alude al efecto de la velocidad en la generación de emisiones.

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{TSP,s,j} \times f_{s,i} \times S_s(V)$$

TE corresponde a la emisión total para el período de tiempo y límite espacial definidos [g]; N_j es el número de vehículos en la categoría j dentro del límite espacial definido; M_j representa el kilometraje [km] recorrido por cada vehículo en la categoría j durante el período de tiempo definido; $EF_{TSP,s,j}$ es el factor de emisión másico de TSP para los vehículos en la categoría j [g/km]; $f_{s,i}$ es la fracción másica de TSP que puede atribuirse a la clase de tamaño de partícula i ; y $S_s(V)$ es el factor de corrección para una velocidad media de circulación del vehículo V .

Las fracciones de masa, las cuales se utilizaron para obtener la proporción de PM₁₀ y PM_{2,5} con respecto a las partículas totales suspendidas, se obtuvieron a través de literatura directamente, extrapolaciones de datos disponibles y mediciones de muestras pequeñas.

Tabla 4: Distribución másica del tamaño de partículas por desgaste de neumáticos [29].

Tamaño de partícula [i]	Fracción de masa de TSP
TSP	1,000
PM10	0,600
PM2.5	0,420
PM1	0,060
PM0.1	0,048

Tabla 5: Distribución másica del tamaño de partículas por desgaste de frenos [29].

Tamaño de partícula [i]	Fracción de masa de TSP
TSP	1,000
PM10	0,980
PM2.5	0,390
PM1	0,100
PM0.1	0,080

Tabla 6: Distribución másica del tamaño de partículas por desgaste de carreteras [29].

Tamaño de partícula [i]	Fracción de masa de TSP
TSP	1,00
PM10	0,50
PM2.5	0,27

A diferencia de la metodología de Tier 1, el Tier 2 realiza una segregación más exhaustiva de las tipologías de vehículo, clasificándolos por su sistema de propulsión y por el kilometraje de cada categoría vehicular según un tiempo definido.

Tabla 7: Factor de emisión de TSP correspondientes para cada categoría vehicular proveniente de emisiones por desgaste de neumático, interpretado de EMEP (2024) [29].

Categoría Vehicular [j]	Factor de emisión de TSP [g/km]
Motocicletas	0,0046
Vehículos pasajeros – MCI – Mini	0,0085
Vehículos pasajeros – MCI – Pequeño	0,0096
Vehículos pasajeros – MCI – Mediano	0,0107
Vehículos pasajeros – MCI – Grande	0,0118
Vehículos pasajeros – Híbrido – Mini	0,0089
Vehículos pasajeros – Híbrido – Pequeño	0,0100
Vehículos pasajeros – Híbrido – Mediano	0,0111
Vehículos pasajeros – Híbrido – Grande	0,0123
Vehículos pasajeros – PHEV – Pequeño	0,0101
Vehículos pasajeros – PHEV – Mediano	0,0112
Vehículos pasajeros – PHEV – Grande	0,0124
Vehículos pasajeros – BEV – Pequeño	0,0105
Vehículos pasajeros – BEV – Mediano	0,0116
Vehículos pasajeros – BEV – Grande	0,0127
Vehículos comerciales livianos (N1 – I)	0,0107
Vehículos comerciales livianos (N1 – II, III)	0,0169

Tabla 8: Factor de emisión de TSP correspondientes para cada categoría vehicular proveniente de emisiones por desgaste de freno, interpretado de EMEP (2024) [29].

Categoría Vehicular [j]	Factor de emisión de TSP [g/km]
Motocicletas	0,0037
Vehículos pasajeros – MCI – Mini	0,0082
Vehículos pasajeros – MCI – Pequeño	0,0102
Vehículos pasajeros – MCI – Mediano	0,0122
Vehículos pasajeros – MCI – Grande	0,0143
Vehículos pasajeros – Híbrido – Mini	0,0065
Vehículos pasajeros – Híbrido – Pequeño	0,0081
Vehículos pasajeros – Híbrido – Mediano	0,0097
Vehículos pasajeros – Híbrido – Grande	0,0114
Vehículos pasajeros – PHEV – Pequeño	0,0055
Vehículos pasajeros – PHEV – Mediano	0,0066
Vehículos pasajeros – PHEV – Grande	0,0077
Vehículos pasajeros – BEV – Pequeño	0,0030
Vehículos pasajeros – BEV – Mediano	0,0035
Vehículos pasajeros – BEV – Grande	0,0040
Vehículos comerciales livianos (N1 – I)	0,0122
Vehículos comerciales livianos (N1 – II, III)	0,0173

Tabla 9: Factor de emisión de TSP correspondientes para cada categoría vehicular proveniente de emisiones por desgaste de carretera, interpretado de EMEP (2024) [29].

Categoría Vehicular [j]	Factor de emisión de TSP [g/km]
Motocicletas	0,0060
Vehículos pasajeros – MCI – Mini	0,0105
Vehículos pasajeros – MCI – Pequeño	0,0127
Vehículos pasajeros – MCI – Mediano	0,0150
Vehículos pasajeros – MCI – Grande	0,0174
Vehículos pasajeros – Híbrido – Mini	0,0113
Vehículos pasajeros – Híbrido – Pequeño	0,0135
Vehículos pasajeros – Híbrido – Mediano	0,0159
Vehículos pasajeros – Híbrido – Grande	0,0183
Vehículos pasajeros – PHEV – Pequeño	0,0137
Vehículos pasajeros – PHEV – Mediano	0,0161
Vehículos pasajeros – PHEV – Grande	0,0185
Vehículos pasajeros – BEV – Pequeño	0,0145
Vehículos pasajeros – BEV – Mediano	0,0169
Vehículos pasajeros – BEV – Grande	0,0194
Vehículos comerciales livianos (N1 – I)	0,0150
Vehículos comerciales livianos (N1 – II, III)	0,0210
Vehículos de carga pesada	0,0760

1.5.2. Benjamín Encalada (2023)

Esta memoria realiza un estudio de las emisiones de material particulado generado por procesos abrasivos en vehículos terrestres, conocido también como emisiones non-exhaust. En la memoria se realiza un marco teórico de los componentes del material particulado por procesos abrasivos, incluyendo el desgaste de frenos, neumáticos y superficie de rodadura. A diferencia de las emisiones de escape, que han sido ampliamente controladas debido al conocimiento y estudios extensos que ya se han realizado sobre el tema durante los años, recalca que las emisiones por desgaste persisten incluso con la transición a vehículos eléctricos, debido al aumento de peso de estos últimos y la falta de políticas de mitigación para disminuir el nivel de emisiones generadas por cada fuente.

El objetivo general de este trabajo es calcular las emisiones de material particulado por procesos abrasivos en Chile, por lo que, previo a ese cálculo de emisiones, se hace un estudio de literatura, con el fin de obtener factores de emisión específicos para vehículos livianos, pesados y motocicletas, basados en una recopilación de estudios internacionales. Se reúnen todos los factores de emisión obtenidos en el estudio de literatura y se obtiene un promedio para cada categoría vehicular; y considerando la base de datos obtenida a partir del informe SECTRA, el cual entrega los datos de la actividad vehicular para cada año desde el 2018

hasta el 2020, realiza la multiplicación directa de la actividad vehicular con los factores de emisión obtenidos, estimando los niveles de emisión totales vehiculares.

A partir del cálculo, obtiene los siguientes niveles de emisión categorizados por fuente abrasiva, año y tamaño de partícula.

Tabla 10: Emisiones de PM_{2,5} por procesos abrasivos en Chile 2018-2020 [30].

Emisiones [Gg/año]	2018	2019	2020	Porcentaje de PM _{2,5}
PM _{2,5} Frenos	0.3288	0.3217	0.2906	29%
PM _{2,5} Neumáticos	0.2967	0.2902	0.2617	26%
PM _{2,5} Superficie	0.5147	0.504	0.4576	45%
PM _{2,5} Total	1.1401	1	1	100%

Tabla 11: Emisiones de PM₁₀ por procesos abrasivos en Chile 2018-2020 [30].

Emisiones [Gg/año]	2018	2019	2020	Porcentaje de PM ₁₀
PM ₁₀ Frenos	1.2075	1.1818	1.0695	41%
PM ₁₀ Neumáticos	0.837	0.8192	0.7414	29%
PM ₁₀ Superficie	0.8757	0.8566	0.7723	30%
PM ₁₀ Total	2.9203	2.8576	2.5832	100%

A partir de las emisiones calculadas, realiza una comparación entre estas y las emisiones por escape desde el 2018 hasta el año 2020, extraída a partir de literatura, obteniendo los siguientes gráficos de comparación:

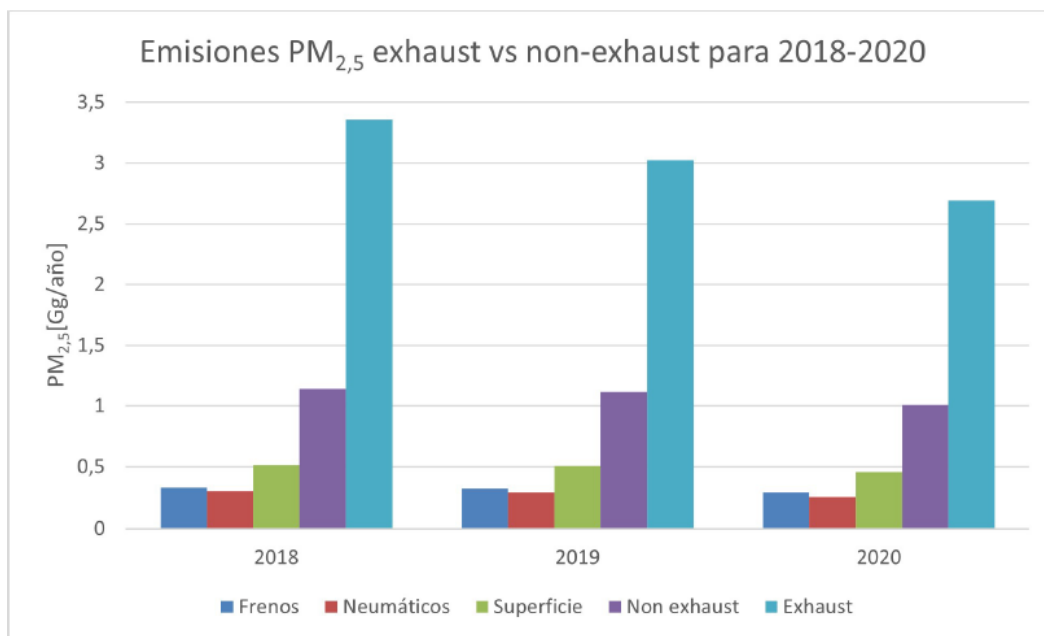


Figura 6: Comparación de niveles de emisión PM_{2,5} [Gg/año] entre emisiones de escape y desgaste abrasivo entre 2018-2020 [30].

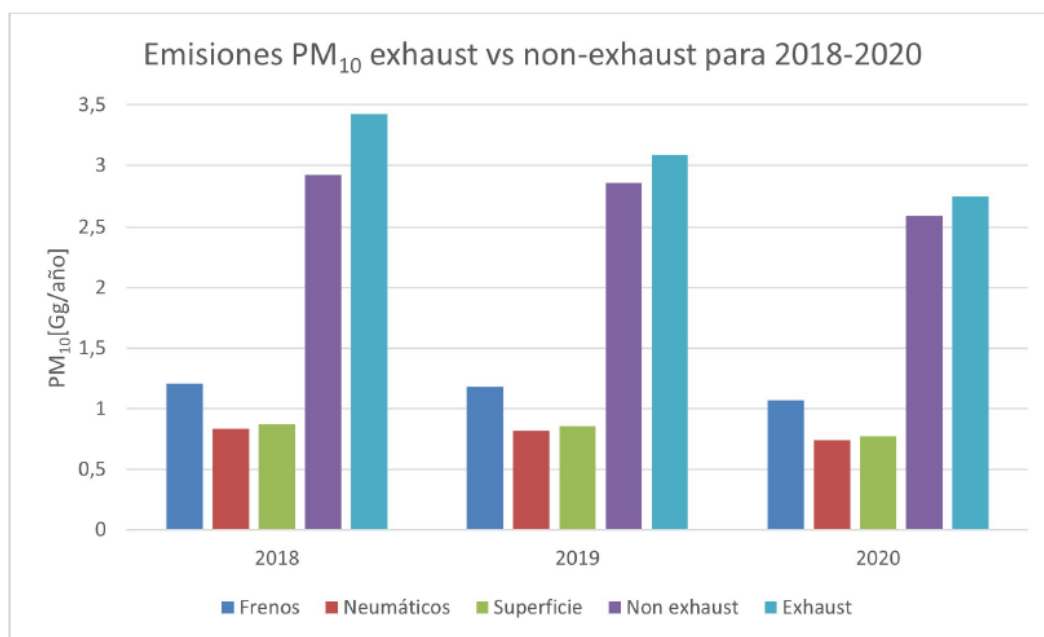


Figura 7: Comparación de niveles de emisión PM₁₀ [Gg/año] entre emisiones por escape y desgaste abrasivo 2018-2020 [30].

A partir de la información, realiza una desagregación espacial de las emisiones non-exhaust para PM_{2,5} y PM₁₀ obtenidas durante el 2020 en ciudades como Santiago y Concepción, donde se observa que las zonas urbanas mostraron mayores concentraciones de

PM debido a la conducción intermitente (frenadas y aceleraciones frecuentes), mientras que las vías interurbanas registraron niveles más bajos.

Finalmente, realiza una estimación de las emisiones por desgaste para el año 2050 considerando los siguientes escenarios:

- Escenario base: Crecimiento natural de emisiones sin intervenciones.
- Escenario 1: Mitigación solo en vehículos eléctricos (frenos regenerativos + neumáticos sostenibles).
- Escenario 2: Mitigación extendida a vehículos convencionales (neumáticos de bajo desgaste en toda la flota).
- Escenario 3: Máxima mitigación, incorporando sistemas de aspiración de partículas en los frenos.

Para cada escenario, considera distintos porcentajes de crecimiento de las partículas PM_{2,5} y PM₁₀, obteniendo los siguientes gráficos.

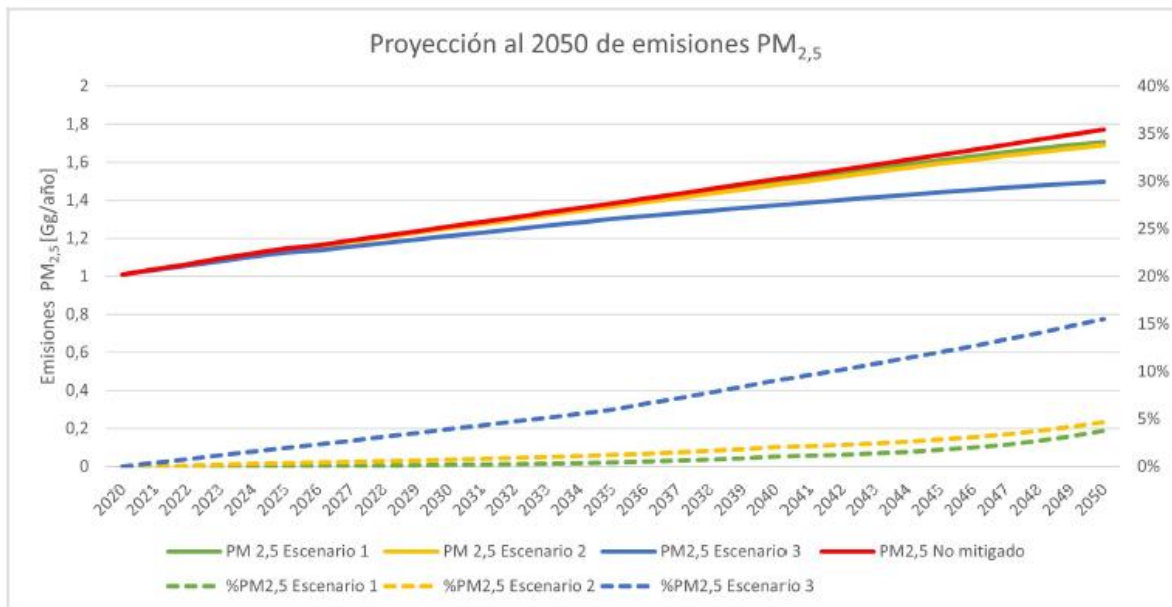


Figura 8: Proyección de las emisiones de PM_{2,5} para el año 2050 considerando distintos escenarios [30].

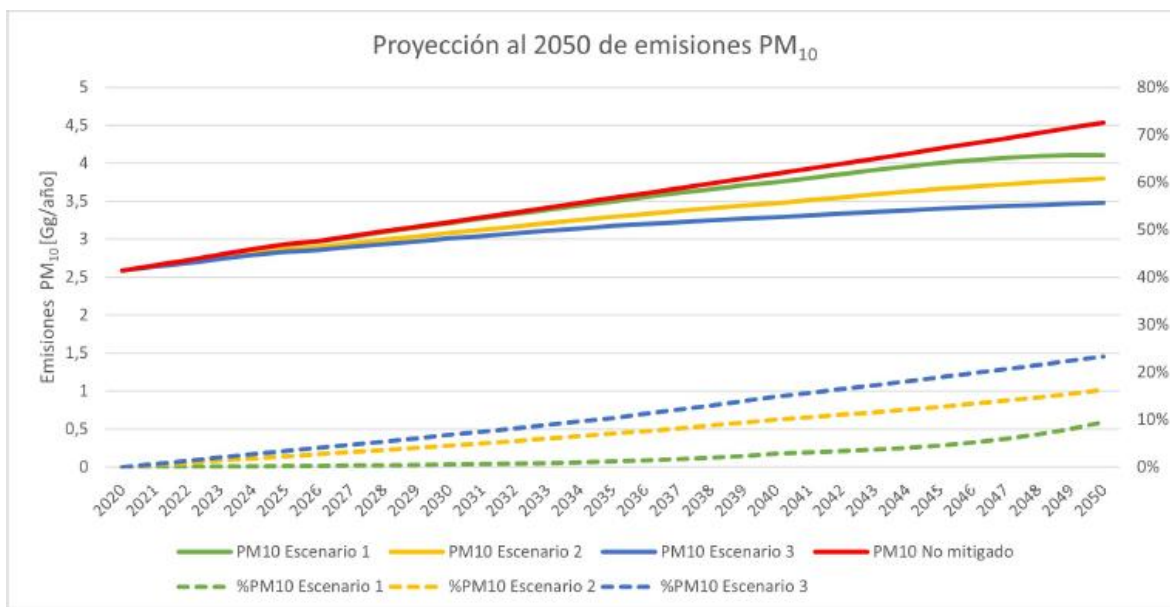


Figura 9: Proyección de las emisiones de PM₁₀ para el año 2050 considerando distintos escenarios [30].

Se observa una correlación directa en la Figura 8 y la Figura 9 con respecto al nivel de intervención y las emisiones generadas, de tal manera que, al implementar medidas agresivas de mitigación, la pendiente de la proyección de las emisiones disminuye.

1.5.3. Q. Zhang et al. (2024)

Este estudio aborda la medición directa de partículas de desgaste de frenos y neumáticos bajo condiciones reales de conducción, lo cual fue conseguido a través de un montaje experimental. Se utilizó el Michigan Scientific Corporation (MSC) Company Model LW12.8–50, que corresponde a un sistema que mide fuerzas y momentos en las tres direcciones con un GPS que permite registrar la trayectoria y velocidad. Este sistema está instalado en un adaptador ubicado en la rueda de un vehículo pasajero, y también incluye un sensor de aceleración y un sensor de temperatura para registrar los cambios de temperatura en las pastillas de freno durante el proceso de manejo.

Con fin de poder representar con mayor precisión un ciclo de manejo real, se desarrolla una ruta, la cual está clasificada en tres secciones: urbano (velocidades menores a 60[km/h]), rural (60-90 [km/h]) y autopista (velocidades mayores a 90 [km/h]).

Como banco de pruebas para el desgaste de frenos, se utiliza el dinamómetro LINK 3000, el cual se utiliza para simular 200 segmentos de frenado las cuales se dividieron en 90, 70 y 40 segmentos para condiciones urbanas, rurales, y de autopista, respectivamente. Para minimizar los efectos ambientales en las mediciones, el estudio se realiza en una cámara hermética, la cual cuenta con un filtro HEPA, que permite ventilación con aire limpio. Además, se conecta un sistema de muestreo a la cámara mediante tuberías, donde el aire de

la ventilación ayuda al ingreso de partículas de abrasión a través de las tuberías hacia el sistema de muestreo.

Para simular el desgaste de neumáticos bajo las condiciones reales se emplea el High Dynamic Outsider Wheel Tester, el cual consta de un anillo exterior giratorio para replicar la rugosidad del asfalto y alterar la velocidad rotacional; un brazo robótico controlado por software que ajusta dinámicamente la inclinación y velocidad del neumático; y un tanque colector de partículas debajo de la interfaz neumático-anillo, conectado a muestreadores de flujo constante. Con fin de mejorar la precisión del experimento, se mitigan los efectos ambientales externos a través del uso de una caja semicerrada alrededor del neumático, donde la fuerza del viento y la gravedad contribuyen para traer las partículas de desgaste al tanque colector de partículas.

Para mediciones en tiempo real, se utilizaron dos instrumentos: ELPI+ y el APS 3321. El instrumento ELPI+ opera a 10 [L/min], clasificando partículas entre 6 [nm] y 10 [μm] en 14 fracciones mediante un impactador de baja presión que mide corrientes eléctricas generadas por partículas cargadas. APS 3321 corresponde a un instrumento de alta precisión, al igual que ELPI+, y funciona a 5 [L/min], utilizando láseres paralelos para analizar partículas de diámetro aerodinámico desde 0,5 hasta 20 [μm]. Ambos equipos capturan datos a 1 [Hz], permitiendo monitoreo continuo de concentraciones y distribución de tamaños.

Para calcular el factor de emisión del desgaste de frenos y neumáticos con la información obtenida de ELPI+ y APS 3321, se utiliza la siguiente fórmula:

$$EF = \frac{S \times v \times \int_{t_0}^{t_1} (c_t - c_0) dt}{L}$$

EF es el factor de emisión de partículas [mg/km], S es el área transversal del conducto de muestreo [m²], v es la velocidad interna del viento en el conducto [m/s], t0 es el tiempo de inicio del muestreo [s], t1 es el tiempo en el que la concentración en el cilindro de muestreo retorna a los niveles iniciales [s], c_t es la concentración másica de partículas en el tiempo t [mg/m³], c_0 es la concentración másica media de partículas iniciales [mg/m³] y L es la distancia recorrida durante el ciclo de prueba [km].

Además, para poder tener la opción de analizar las muestras de manera offline, se utilizaron cuatro muestreadores gravimétricos HY-100WS que operan a 100 [L/min] que tienen cabezales para PM2,5 y PM10, capturando partículas en filtros de cuarzo y politetrafluoroetileno. El análisis offline se realiza mediante la comparación de la masa de los filtros antes y después del muestreo, con el objetivo de ser comparados con los dos instrumentos de alta precisión y validar el cálculo de factores de emisión a realizar en las etapas posteriores. La fórmula por utilizar para esta metodología es la siguiente:

$$EF = \frac{m_{m1} - m_{m0}}{L} \times 10^3$$

m_{m1} es la masa de la membrana de filtro después del muestreo [g], m_{m0} es la masa de la membrana en blanco [g] y L es la distancia recorrida durante el ciclo de prueba [km].

Debido a que no hay una prueba estandarizada para la medición del desgaste de neumáticos, se desarrolla una para simular la postura de las ruedas al estar sometidas a las distintas fuerzas laterales durante un ciclo de conducción real, destacando que se prueban 9 neumáticos distintos para observar su comportamiento a través del experimento. A continuación, se muestran los factores de emisión obtenidos para desgaste de freno y neumático.

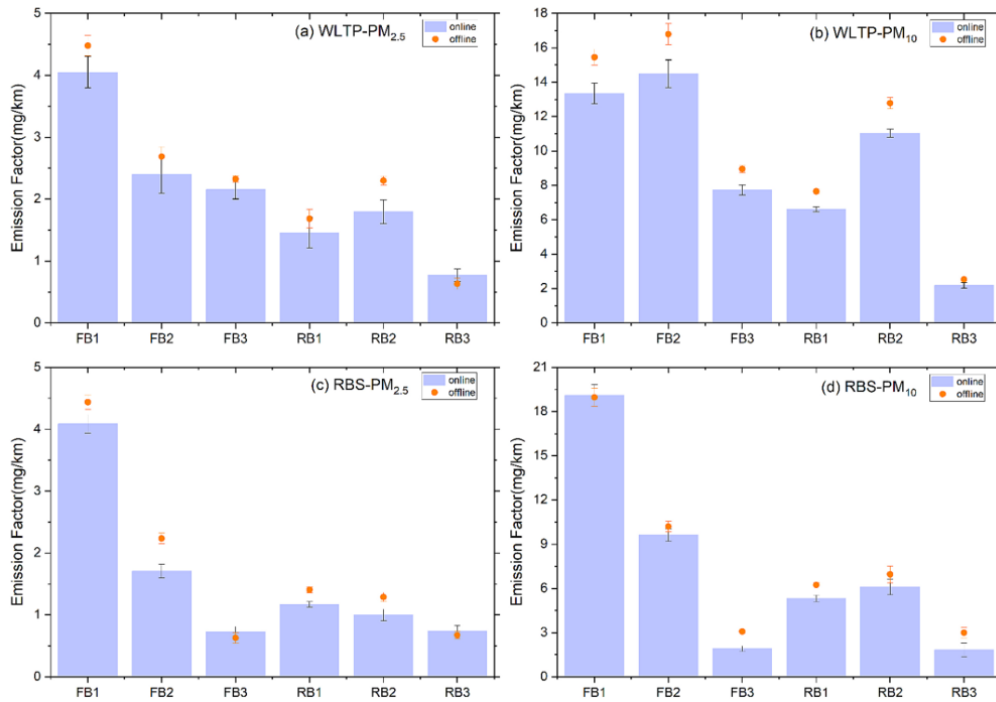


Figura 10: Factores de emisión PM_{2,5} y PM₁₀ de desgaste de freno a través de método online y medición de filtros.

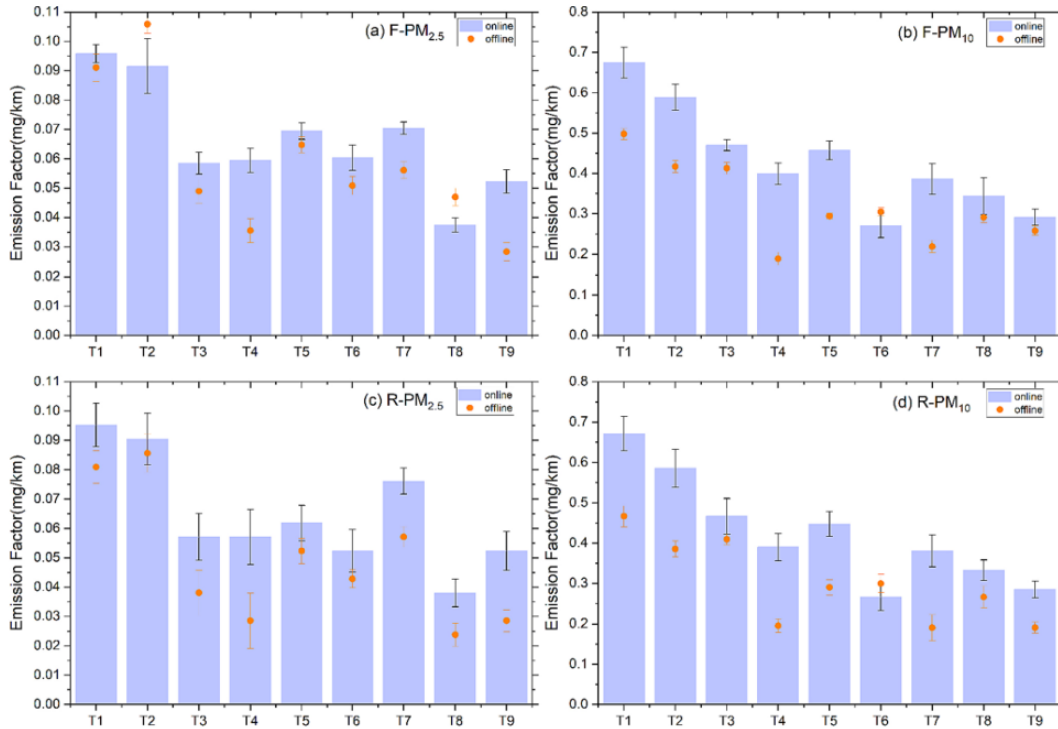


Figura 11: Factores de emisión PM_{2,5} y PM₁₀ de desgaste de neumáticos a través de método online y medición de filtros.

A partir del dato que las pastillas de freno cerámicas se introducen al mercado con posterioridad a las metálicas, el cálculo del factor de emisión ponderada se considera una proporción de 2:1, de las pastillas metálicas con respecto a las cerámicas, entregando un valor de 2,66 [mg/km] para PM_{2,5} y 11,65 [mg/km] para PM₁₀.

Con respecto a los neumáticos y el mercado, se hace al cálculo de factores asumiendo que el 90% de los neumáticos son de temporada, y que el 10% restante son de nieve. A partir de esa información se calcula un promedio ponderado, obteniendo 0,21 [mg/km] para PM_{2.5} y 1,27 [mg/km] para PM₁₀.

1.5.4. Lee et al. (2023)

Este estudio busca medir las emisiones producidas por desgaste abrasivo de frenos de tambor en vehículos pesados, específicamente en tres vehículos de clase 6 y uno de clase 8. Se menciona que la aplicación de los métodos tradicionales para medición de emisiones por desgaste es inviable, aludiendo a las mediciones con dinamómetros de freno y de chasis.

Para la metodología de dinamómetro de freno, se utilizan túneles de succión instalados cercana a la ubicación de la interacción entre el freno y la rueda para extraer las partículas emitidas durante el proceso, pero resulta inviable para el caso de los vehículos pesados, ya que, en su mayoría llevan incluido un sistema de frenado de tambor, donde la rueda está encapsulada en un tambor que gira solidaria a ella, generando interferencia en la instalación de dicho sistema. La razón adicional por la que se opta no utilizar este sistema es debido a que los túneles suelen capturar todas las partículas producidas durante el experimento, lo cual no es representativo de la realidad, ya que siempre hay un pequeño porcentaje de partículas que quedan depositadas en las superficies donde se produce la interacción, generando una sobrestimación del factor de emisión de freno.

Al evaluar el método de dinamómetro de chasis, también se observó que es incapaz de ser aplicado para este caso, ya que solamente mide concentraciones puntuales cercanas a la pastilla de freno, y no incluye un sistema de contención de partículas que pueda relacionar esas concentraciones con un factor de emisión. Además, mencionaba que los muestreos eran muy variables, principalmente debido a los cambios en la dirección del flujo de aire convectivo que transporta estas partículas, siendo influenciada por la rotación de las ruedas y su comportamiento durante todo el ciclo de conducción.

Para realizar un estudio certero de las emisiones de freno generadas en un vehículo de carga pesada, se opta por el uso de la metodología de gas trazador.

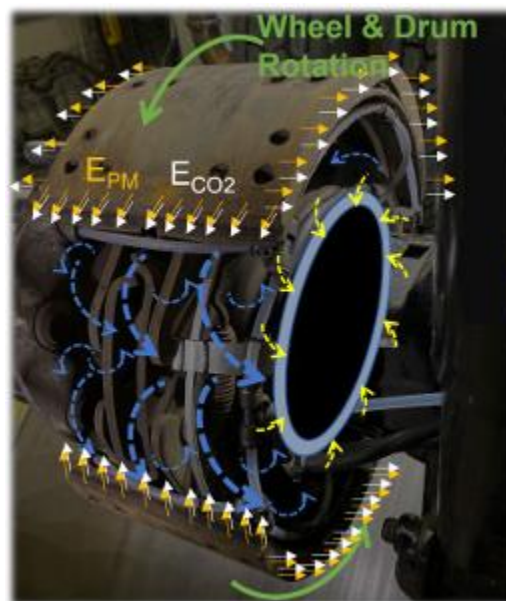


Figura 12: Esquema de flujos dentro del montaje de freno de tambor [31].

A partir de la Figura 12, se puede observar la dirección que toman los flujos involucrados en el montaje experimental, destacando que el tambor está desacoplado con el fin de poder visualizar los flujos y sus direcciones de manera correcta. Este método consiste en tubos de PTFE con 72 inyectores instalados en el borde de contacto entre las zapatas de freno y el tambor, donde el gas trazador corresponde a una mezcla de 15% de CO_2 en N_2 (Flecha blanca) y fluye a una velocidad baja de 0,28[m/s] con fin de no alterar la trayectoria del material particulado (Flecha naranja). El material particulado y el gas trazador se diluyen en el flujo de aire convectivo (Flecha punteada azul) generado por la rotación de la rueda y el tambor (Flecha verde). Esta mezcla (Flecha punteada amarilla) se dirige hasta una sonda circular que está ubicada en el alojamiento del eje, clarificando que la sonda lleva esa forma debido a su capacidad de permitir un muestreo simétrico y sin dependencia de la dirección del flujo de aire, a diferencia del método de dinamómetro de chasis con muestreos puntuales.

Para las mediciones de concentraciones de material particulado se utiliza el instrumento DusTrak RDX, además, se utiliza tanto un CPC y un EEPS para monitorear las concentraciones de partículas. Para medir en tiempo real las concentraciones del gas trazador diluido se utiliza un analizador de gases infrarrojo, y se incorpora un sistema MOUDI al montaje experimental para hacer una recolección de material particulado de manera segregada por tamaño, con capacidad desde 10 [nm] hasta 18 [μ m].

Con fin de obtener la tasa de emisión de material particulado de los frenos, primero se calcula el factor de recuperación (RF), que alude a la proporción entre la masa del gas trazador desde su fuente hasta la sonda de muestreo, y su fórmula es la siguiente:

$$RF = \frac{C_{TG_Feed} \times Q_{TG_Feed}}{C_{TG-BG} \times Q_{Sample}}$$

Donde $\dot{M}_{Feed}$ es el caudal másico de alimentación del gas trazador [mg/s], $\dot{M}_{Sample}$ es el caudal másico de muestra del gas trazador [mg/s], C_{TG_Feed} es la concentración de alimentación del gas trazador [mg/L], C_{TG-BG} es la concentración de gas trazador corregida por fondo [mg/L], Q_{TG_Feed} es el caudal volumétrico de alimentación del gas trazador [L/s]; y Q_{Sample} es el caudal volumétrico total de muestreo [L/s].

Una vez obtenido el factor de recuperación, se utiliza la siguiente fórmula para obtener la tasa de emisión de material particulado:

$$E_{PM} = RF \times C_{PM} \times Q_{Sample}$$

Donde E_{PM} corresponde a la tasa de emisión de PM por desgaste de frenos, RF es el factor de recuperación, C_{PM} es la concentración másica de material particulado medida en la muestra, y Q_{Sample} es el caudal volumétrico total de muestreo.

A partir de lo mencionado, se realizan los ciclos de conducción para los tres vehículos clase 6 (6A, 6B y 6C), con un ciclo que simula entrega de paquetes, y para el vehículo clase 8 se realizan tres ciclos distintos: Entrega de paquetes, UDDS (Ciclo representativo de las

condiciones de manejo en la ciudad), y HHDDT (ciclo de conducción para camiones diésel de carga pesada) [32].

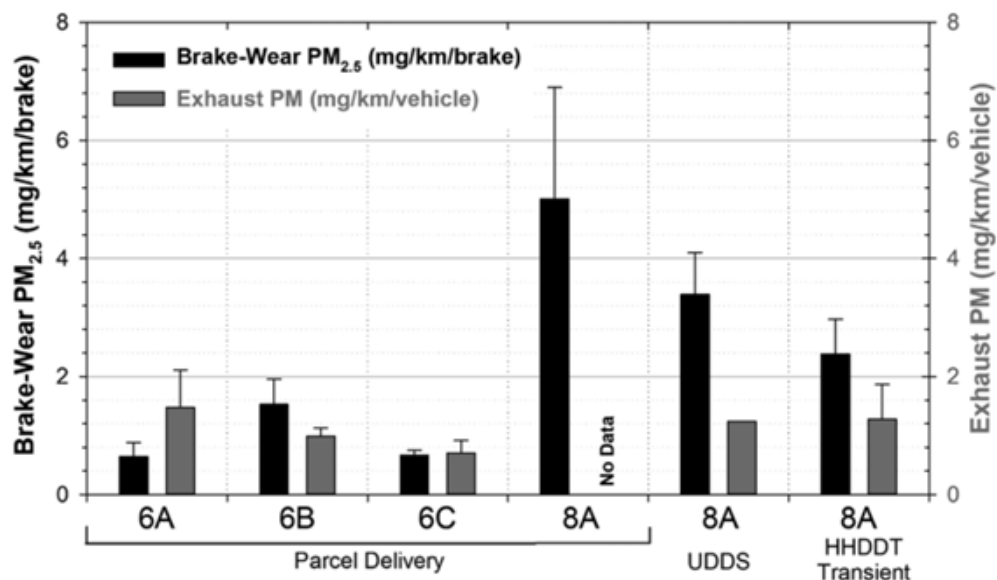


Figura 13: Comparación de PM_{2,5} generado por desgaste de freno y material particulado de gases de escape.

Desde la Figura 13 se puede observar que a medida que aumenta el peso de los vehículos, las emisiones generadas por desgaste de freno van tomando mayor importancia que las emisiones de escape, lo cual se puede observar en el vehículo clase 8. A partir de las mediciones, se obtienen los siguientes valores de emisiones de freno, observables en la Tabla 12.

Tabla 12: Emisiones de freno para cada vehículo y ciclo de conducción [33].

Vehículo	Emisiones de Freno [mg/km/freno]
6A	0,65
6B	1,53
6C	0,67
8 (Ciclo entrega)	5,01
8 (UDDS)	3,39
8 (HHDDT)	2,38

Se destaca que los valores de emisión reportadas en el estudio se realizaron por freno debido a limitaciones del dinamómetro de dos ruedas, que solo permitió muestrear un freno trasero mientras los delanteros permanecían bloqueados.

1.5.5. Yin et al. (2025)

Con el fin de obtener factores de emisión de freno para vehículos eléctricos de carga liviana y vehículos de carga pesada, se realiza una medición de laboratorio y un análisis en base a machine learning para observar la dependencia de las emisiones según distintos parámetros vehiculares. Para llevar a cabo este estudio, se utiliza un dinamómetro de chasis AVL ROADSIM™ 48 para simular las condiciones de manejo de los vehículos de carga liviana, y también se utiliza un sistema propio para recolectar el material particulado de los frenos. El sistema mencionado cuenta con una unidad de colección, transporte y medición, el cual se prueba y verifica mediante una medición con partículas de aerosol.

Para los vehículos de carga pesada se utiliza un dinamómetro de freno modificado LINK 6900, el cual incluye un equipo APS 3321 que sirve para clasificar las partículas según tamaño, y que también incluye un muestreador de partículas para flujos medianos de modelo HY-42 100WS para determinar el contenido metálico de las partículas de freno.

Para los vehículos de carga liviana, se evalúan cuatro vehículos como sujetos de estudio: un vehículo eléctrico híbrido (PHEV, Vehículo 2), un vehículo de autonomía extendida (EREV, Vehículo 3), un vehículo eléctrico puro (BEV, Vehículo 4), junto con un Vehículo 1 de combustión interna convencional, que corresponde a la versión no electrificada del Vehículo 2, que se emplea para simular las emisiones del Vehículo 2 con ausencia de freno regenerativo, dada la imposibilidad procedimental de desactivar el sistema regenerativo en los vehículos eléctricos durante las pruebas. Todos los modelos son sometidos a ciclos de conducción estandarizados WLTC y CLTC-P, destacando que en el ciclo WLTC se consideran los segmentos de media y baja velocidad únicamente, dado que los vehículos de carga liviana operan en su mayoría en zonas urbanas, donde la velocidad vehicular no llega a niveles altos.

Los vehículos de carga pesada evaluados son dos buses de pasajeros y un camión de carga. De los dos buses seleccionados para el estudio, uno cuenta con discos de freno (Vehículo 5) mientras que el otro tiene un freno de tambor (Vehículo 6), y ambos son evaluados con cargas distintas, de 5, 25, 50 y 70 pasajeros, asumiendo una carga de 75 [kg] por pasajero, mientras que el camión de carga (Vehículo 7) está equipado con discos de tambor y se evalúa sin carga. Con el fin de evaluar las emisiones de freno de los vehículos de carga pesada, para el caso de los buses, se utilizan los ciclos chinos de conducción de autobuses urbanos (CHTC-B), ciclos para autobuses de larga distancia (CHTC-C) y un ciclo combinado de estándares chinos e internacionales para ciclos transitorios (C-WTVC), mientras que en el caso del camión de carga se utiliza el ciclo chino para camiones de carga pesada (CHTC-HT) y el ciclo japonés para conducción transitoria de vehículos de carga pesada (JE05).

En cuanto al cálculo de emisiones, se define la fórmula de factor de emisión, la cual se calcula a partir de la información entregada por el APS y se muestra a continuación:

$$EF = \frac{S \times v \times \int_{t_0}^{t_1} (c_t - c_0) dt}{d}$$

Donde EF es el factor de emisión de partículas por desgaste de frenos [mg/km/freno], S es el área transversal del tubo de muestreo [m²], v es la velocidad del flujo de aire configurada dentro del tubo [m/s], t_0 es el tiempo inicial de muestreo durante el experimento [s], t_1 es el tiempo final del experimento [s], c_t es la concentración másica de partículas en el instante t después de iniciado el muestreo [mg/m³], c_0 es la concentración másica promedio de partículas de fondo antes y después del muestreo [mg/m³], y d es la distancia recorrida en el ciclo de prueba [km].

Las emisiones de PM_{2,5} obtenidas para los vehículos livianos se pueden visualizar en la Figura 14.

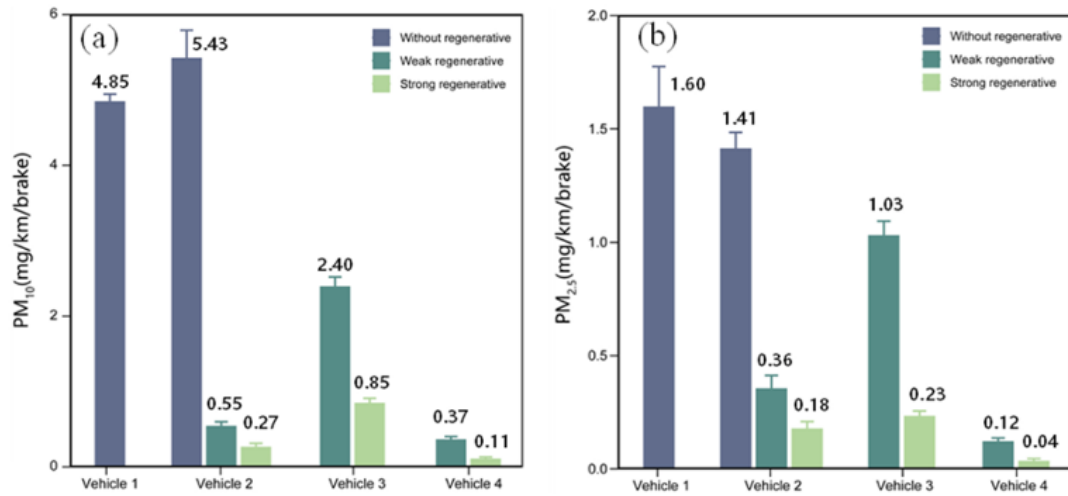


Figura 14: Factores de emisión de partículas por desgaste de frenos (media $\pm$ desviación estándar) para vehículos de carga liviana en tres ciclos de conducción con distintos modos de frenado regenerativo: (a) emisiones de PM₁₀ y (b) emisiones de PM_{2,5} [34].

A partir de la Figura 14, se puede observar una disminución de las emisiones de freno a medida que mejora el sistema de frenado regenerativo, ya que la carga que sufre el sistema de frenado mecánico va disminuyendo.

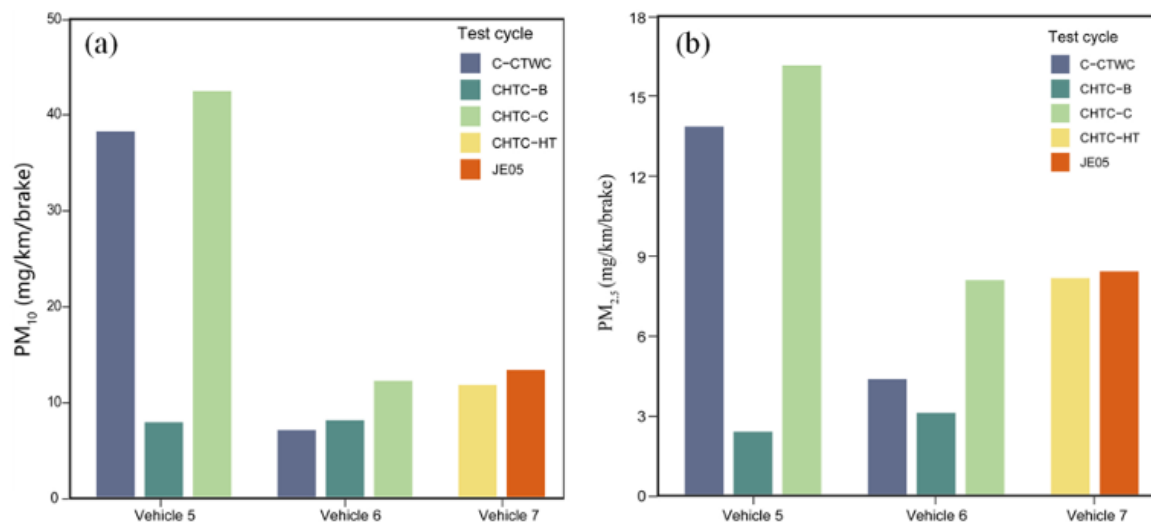


Figura 15: Factores promedio de emisión de partículas por desgaste de frenos para vehículos de carga pesada bajo diferentes ciclos de prueba: (a) PM₁₀ y (b) PM_{2,5} [34].

A partir de la Figura 15, se obtienen las emisiones promedio de los tres vehículos de carga pesada (Vehículo 5, 6 y 7). Los factores promedio de emisión de PM₁₀ y PM_{2,5} para los tres vehículos se muestran en la Tabla 13 a continuación:

Tabla 13: Emisiones promedio de PM₁₀ y PM_{2,5} por cada vehículo de carga pesada.

Nº de Vehículo	Emisiones PM10 [mg/km/freno]	Emisiones PM2,5 [mg/km/freno]
5	29,7	10,8
6	9,4	5,3
7	12,8	8,3

1.5.6. Storch et al. (2023)

Este estudio busca comprender y analizar las medidas de mitigación de las emisiones de partículas abrasivas de freno. Para lograr esto, se analizan las emisiones de un vehículo compacto de segmento C con distintos materiales de pastilla, zapata y distintas electrificaciones vehiculares. Además, se evalúa un SUV de segmento J para comparar las emisiones entre un disco de freno convencional y alternativo.

El montaje experimental consiste en un dinamómetro de freno LINK 3900 NVH, el cual fue montado usando las manguetas reales del vehículo para replicar la posición de las mordazas de freno del dinamómetro, recalcando que la mangueta corresponde a una pieza robusta de acero con varios brazos salientes, ubicada justo detrás de las ruedas delanteras y que tiene la función de conectar el buje de la rueda a la suspensión [35].

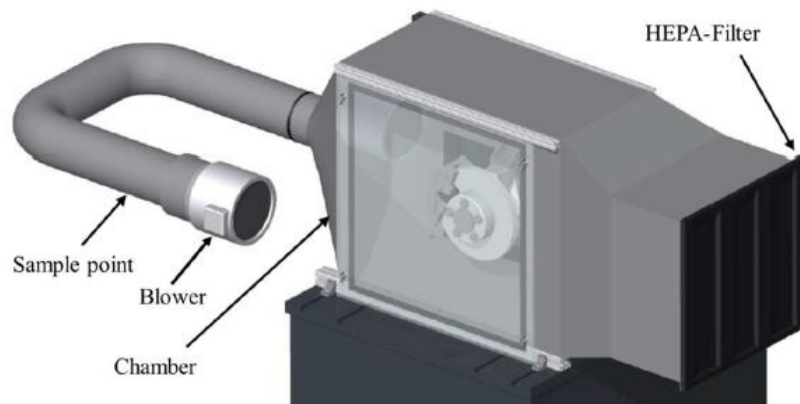


Figura 16: Montaje de sistema de muestreo a volumen constante (CVS) [36].

El dinamómetro se encuentra conectado a un sistema de muestreo a volumen constante (CVS) acoplado a un filtro HEPA para permitir el ingreso de aire filtrado en la cámara, tal y como se observa en la Figura 16. En el punto de muestreo (Sample point), se instalan tres sondas: para medición de número de partículas, material particulado y distribución de partículas por tamaño.

Centrando la información en solamente las consideraciones para el material particulado, para la medición de MP se utiliza un impactador de tres etapas. El primer filtro separa las partículas con diámetro aerodinámico mayor a $10[\mu\text{m}]$, el segundo filtro recolecta todas las partículas con tamaños entre $2,5$ y $10[\mu\text{m}]$, mientras que el último filtro obtiene todas las partículas que se encuentren debajo un diámetro aerodinámico de $2,5[\mu\text{m}]$. Para el análisis gravimétrico de los filtros antes y después del experimento, se utiliza una micro balanza Radwag. Para minimizar los errores en las mediciones, los filtros se sometieron a temperaturas y humedades controladas, además asegurando de que las mediciones en la micro balanza se repitieran 5 veces para cada filtro y utilizar el promedio de esos valores para determinar los factores de emisión.

El ciclo utilizado para evaluar a los vehículos es el World Harmonized Light-Duty Test Procedure (WLTP), que corresponde a un protocolo internacional para simular las condiciones reales de manejo y es ampliamente utilizada en procedimientos como homologación vehicular. Antes de realizar las mediciones, el vehículo se somete a cinco ciclos WLTP con el fin de condicionar los frenos y asegurar un área de contacto homogéneo; una vez realizado, se somete a tres ciclos adicionales para realizar la medición, obteniéndose el factor de emisión a partir del promedio de emisiones obtenido en cada ciclo.

Midiendo las emisiones del vehículo de Segmento C en el freno del eje delantero y trasero, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 14: Emisiones de freno de vehículo de Segmento C en eje delantero y trasero.

Par de fricción	PM10 [mg/km/freno]	PM2,5 [mg/km/freno]	Proporción PM10/PM2,5
Eje delantero	5,3	2,8	1,89
Eje trasero	1,5	0,9	1,66

A partir de la Tabla 14, se observa que las emisiones del eje delantero son significativamente mayores que las traseras, lo cual se ve principalmente afectado por el incremento de carga que sufren los frenos delanteros en el frenado. Esta carga obliga a tener discos de freno más grandes en el eje delantero, incrementando el área de contacto entre el par de fricción, y, por ende, provocando el incremento en las emisiones observadas.

Con respecto a las emisiones de freno en vehículos eléctricos, estas se logran simular a partir de la programación del dinamómetro, donde al vehículo de Segmento C se le realizan disminuciones de carga en ciertos segmentos de frenado, para simular las condiciones de frenado regenerativo de tanto vehículos híbridos enchufables (PHEV), como vehículos eléctricos (BEV). Para el PHEV se le asignó una potencia de generador de 85[kW], mientras que al BEV se le asignan 115[kW]. A partir de esta información, se genera un mapa de frenado regenerativo que entrega los segmentos de frenado para el cual cada tipo de vehículo frena solamente con el par de fricción, con freno combinado, o freno puramente eléctrico.

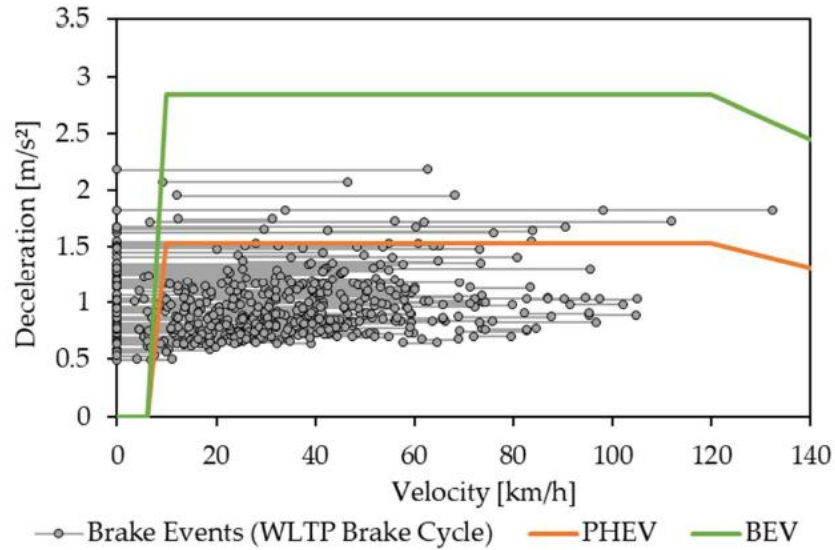


Figura 17: Mapa de freno regenerativo para simulación de PHEV y BEV.

Los segmentos de frenado que se encuentran completamente dentro de las curvas de los vehículos son puramente eléctricos, los segmentos que están parcialmente dentro son de freno combinado, mientras que los segmentos que están fuera de las curvas se llevan a cabo solamente por el par de fricción.

Obteniendo el mapa de frenado regenerativo, se realiza el experimento para cada nivel de electrificación, pero solamente midiendo las emisiones en un freno del eje delantero, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 15: Emisiones de freno de eje delantero según nivel de electrificación.

Nivel de electrificación	PM10 [mg/km/freno]	PM2,5 [mg/km/freno]
PHEV	2,0	1,2
BEV	1,1	0,8

1.5.7. Grigoratos et al. (2023)

El artículo llamado “Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions—Part I: Particulate Matter Mass Emissions” surge del creciente reconocimiento de que las emisiones generadas por el desgaste abrasivo de frenos, neumáticos y de la carretera representan una proporción importante de las partículas en suspensión de los sectores urbanos. En este contexto, el PMP-IWG (Particle Measurement Programme Informal Working Group) desarrolla un estudio entre varios laboratorios para validar un protocolo común de medición de emisiones de frenos, componente clave de la futura normativa EURO 7.

Para lograr esto, se desarrolla una metodología experimental donde se busca evaluar cinco frenos; cuatro frenos de disco y uno de tambor, todas correspondiente a las partes originales de la manufacturera de vehículos. Los frenos evaluados son los siguientes:

- Br1Fa: Freno del eje delantero con pastilla de freno europeo ECE correspondiente al vehículo 1 (M1 Sedan).
- Br1Fb: Freno del eje delantero con pastilla de freno de material NAO correspondiente al vehículo 1 (M1 Sedan).
- Br2: Freno de eje delantero del vehículo 2 (M1 Sedan).
- Br3: Freno de eje delantero del vehículo 3 (M1 SUV).
- Br4: Freno trasero del vehículo 4 (M1 Compacto).
- Br5La: Freno delantero del vehículo 5, correspondiente a un furgón de carga en condiciones de carga baja (N1 Van).
- Br5Lb: Freno delantero del vehículo 5, correspondiente a un furgón de carga a 90% de capacidad de carga (N1 Van).

Los vehículos mencionados se someten al ciclo de frenado WLTP (Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure) que consiste en una distancia total de 192 [km] y 303 eventos de frenado, la cual se ejecuta con un dinamómetro de frenado, donde el freno a evaluar está encasillado, con conexión a un filtro HEPA, por donde entra el aire al sistema de frenado para simular condiciones reales de manejo, y al otro costado, hay un acople a un túnel de dilución por el cual viajan las partículas de aire y las partículas generadas por la interacción entre la pastilla de freno y el rotor, hasta llegar a los equipos de muestreo de partículas y mediciones de flujo; lo cual se puede visualizar en la Figura 18.

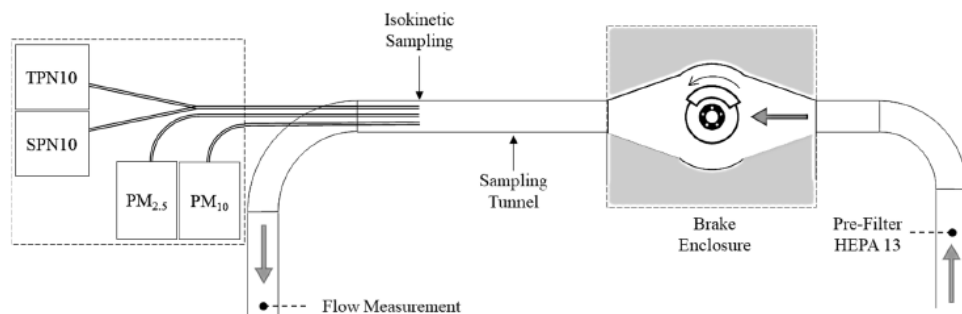


Figura 18: Montaje experimental para la medición de partículas [37].

Además, se entregan las especificaciones del enfriado, ubicaciones y posiciones de los equipos para mejorar la repetitividad del experimento y reducir las variaciones en las mediciones entre laboratorios. El ensayo se estructura en tres fases:

- Fase 1 (Ajuste del enfriamiento): Calibración del flujo de aire para reproducir regímenes térmicos reales, según la relación entre la carga sobre la rueda y la masa del disco (WL/DM).
- Fase 2 (Rodaje o “bedding”): Se estabilizó el comportamiento del freno mediante cinco ciclos WLTP consecutivos, con enfriamientos hasta 40 [°C] entre ellos.
- Fase 3 (Medición de emisiones): Se realizaron tres ciclos WLTP adicionales sin desmontar el freno, manteniendo la temperatura y humedad controladas. Las emisiones se midieron para estos tres ciclos.

El muestreo se realiza con separadores ciclónicos de etapas múltiples, seguidos de filtros gravimétricos donde se colectan las partículas. Los filtros deben presentar una eficiencia superior al 99,5% para una prueba con aerosoles de 0,3 [µm], o 99,9% para partículas de 0,6 [µm]. Se aceptan filtros de fibra de vidrio recubierta de teflón (TCGF) o de PTFE de 47 mm con soporte polimérico, destacando que, cuando se utilizan estos últimos, es obligatorio neutralizar la carga electrostática. En los separadores, los sustratos de impacto (aluminio o policarbonato) se cubren con una fina capa adhesiva y se precalientan para eliminar compuestos volátiles.

Finalmente, los filtros se acondicionan 24 horas antes y después del muestreo en condiciones controladas (22 ± 3 [°C] y 50 ± 10 [%] HR) y se pesan con micro balanzas de 1 [µg] de resolución, verificadas mediante pesas calibradas, asegurando así la fiabilidad de las mediciones gravimétricas.

Tal y como se menciona anteriormente, este experimento se realiza en varios laboratorios; las pruebas de Br1 y Br2 son obligatorias para todos los laboratorios, mientras que la evaluación de los frenos Br3, Br4 y Br5 son opcionales. Las emisiones de PM_{2,5} y PM₁₀ se reportan en gráficos de cajas, además reportando los factores de emisión como un promedio de los resultados obtenidos desde las distintas instalaciones.

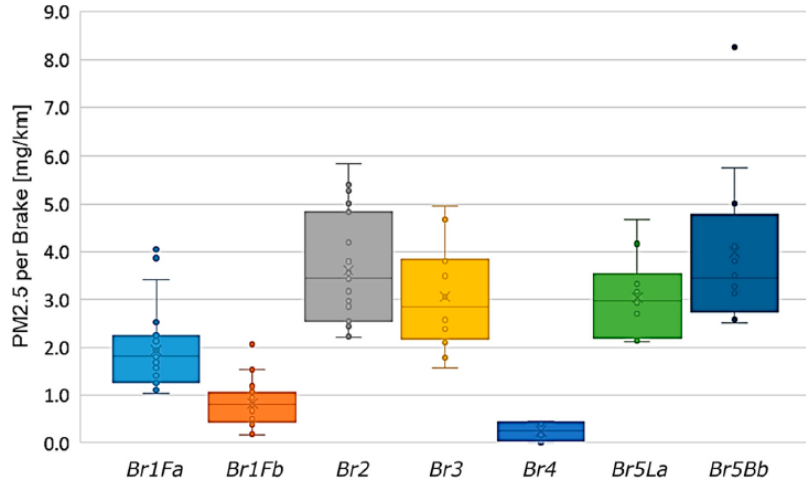


Figura 19: Gráfico de cajas de factores de emisión PM2,5 obtenidos a partir de los experimentos de los distintos laboratorios [37].

Los valores obtenidos para cada freno, incluyendo los valores atípicos (Puntos ubicados fuera de la caja) que se observan en la Figura 19, son utilizados para obtener promedios de factor de emisión para PM2,5, los cuales se observan en la Tabla 16, la cual además resume la información de cada freno:

Tabla 16: Factores de emisión PM2,5 obtenidos a partir del promedio de los resultados de varios laboratorios.

N° vehículo	Eje medido	Nombre de freno	Emisiones PM2,5 [mg/km/freno]
1 (Sedan)	Delantero	Br1Fa	1,9
1 (Sedan)	Delantero	Br1Fb	0,8
2 (Sedan)	Delantero	Br2	3,6
3 (SUV)	Delantero	Br3	3,1
4 (Compacto)	Trasero	Br4	0,3
5 (Van)	Delantero	Br5La	3,0
5 (Van)	Delantero	Br5Lb	4,0

En las secciones posteriores del estudio, se evalúa la repetitividad de las mediciones de PM2,5, donde se observan buenos resultados entre los distintos laboratorios participantes. La mayoría logró un coeficiente de variación (CoV) inferior al 10 %, lo que indica una alta consistencia entre mediciones consecutivas del mismo freno. Los mejores resultados se obtienen con el freno de referencia Br1Fa, mientras que algunos laboratorios muestran mayor variabilidad con frenos de menores emisiones o con PM2,5 muy bajas. Las diferencias observadas se atribuyen principalmente al correcto condicionado de los frenos, al igual que el respeto a los parámetros iniciales establecidos, como el control ambiental o la calibración del flujo de muestreo.

1.5.8. Comentarios de análisis bibliográfico inicial

La investigación inicial de literatura indica que existe una variabilidad considerable entre los estudios recientes, tanto en metodologías como en los factores de emisión entregados. Sin embargo, la evidencia coincide en que las emisiones por desgaste abrasivo representan una proporción creciente del material particulado total y requieren mayor estandarización metodológica. La información obtenida a través de este estudio inicial es crucial para poder realizar la estimación de material particulado y carbono negro, indicando que es ideal desarrollar una metodología de búsqueda para obtener la mayor cantidad de datos posibles acerca del tema.

A primera vista, debido a la gran cantidad de factores de emisión de PM_{2,5} y proporciones de carbono negro entregadas por EMEP (2024), podría resultar ideal la utilización de solamente sus valores para la estimación de emisiones, ya que corresponde a una guía respetada dentro del rubro de las emisiones desarrollada en un año reciente, pero el problema surge en que los valores entregados son referenciados de EMEP-Corinair B770 v1.0, el cual corresponde a un documento del año 2003. Esto justifica la necesidad de realizar un estudio detallado del tema, entregando factores a partir de tanto recopilaciones bibliográficas como ensayos experimentales actuales, ajustando los valores entregados por EMEP (2024) hacia factores de emisión que estén más acorde a la actualidad.

2. Metodología de desarrollo

2.1. Metodología de revisión bibliográfica inicial

Como etapa inicial, se realiza una búsqueda aleatoria en bases de datos universitaria, reportes de internet, y bases de datos de literatura científica como Scopus, WebOfScience y ScienceDirect, donde se utilizan palabras claves como “non-exhaust” y “PM2,5” para encontrar artículos acerca del tema de emisiones por desgaste abrasiva. Se recopilan 7 artículos que entregan factores de emisión para PM2,5, ya sea a partir de revisiones bibliográficas o montajes experimentales, los cuales están descritos en la sección 1.5, donde además se les realiza un análisis de la metodología ocupada, factores de emisión y proporciones de carbono negro obtenidas a partir de dicha metodología.

Esta etapa permite observar a primera vista la disponibilidad de información que existe en cuanto a la cuantificación de emisiones por procesos abrasivos y los equipos utilizados para obtener dichos resultados, para el cual se concluye que la información recopilada da indicios de viabilidad para realizar una estimación de emisiones respaldada.

2.2. Metodología de obtención de factores de emisión

Con fin de obtener la mayor cantidad de información posible con respecto al tema de factores de emisión para distintas categorías vehiculares, se desarrolla la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual corresponde a una guía internacional destinada a mejorar la transparencia y calidad en la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. Su versión más reciente, PRISMA 2020, actualiza la versión original de 2009 para reflejar los avances metodológicos en la identificación, selección, evaluación y síntesis de estudios científicos. Su objetivo es que los autores describan con claridad por qué realizaron la revisión, cómo la llevaron a cabo y qué hallazgos obtuvieron, permitiendo a los lectores evaluar la validez y aplicabilidad de los resultados. La guía también incluye un diagrama de flujo que detalla el proceso de búsqueda y selección de estudios, y una versión específica para resúmenes estructurados [38].

Para aplicar la metodología PRISMA dentro del trabajo, el primer paso consiste en una exploración de las bases de datos WOS y Scopus, donde se aplica una fórmula con palabras claves, la cual tiene el objetivo de englobar todos los artículos que son de utilidad para la obtención de factores de emisión por categoría vehicular. La fórmula incluye operadores booleanos y es la siguiente: *emission* AND ("non-exhaust" OR "non exhaust") OR "brake wear" OR ("tyre wear" OR "tire wear") OR "road wear") AND vehicle*.

Estas palabras se buscan dentro de los títulos, resúmenes y palabras clave de los artículos a encontrar mediante dicha fórmula. Posteriormente, se aplican dos restricciones; primero, el año de publicación se limita a partir de 2005, considerando el aumento de investigaciones relacionadas con las emisiones no exhaustivas. En segundo lugar, el tipo de documento se

restringe a artículos y ponencias de conferencias, incluyendo artículos de acceso anticipado y artículos en proceso.

Con base en estos criterios, la búsqueda final arroja un total de 876 publicaciones. En esta etapa, el equipo de trabajo se organiza en dos parejas de revisores; cada una integrada por un experto en el tema y un no experto. Ambas parejas tienen la tarea de leer el resumen de la mitad de las publicaciones y, a partir de esa lectura, determinar si el artículo es útil y contienen factores de emisión aplicables a la estimación. Si ambos miembros de la pareja coinciden en que la publicación era válida, esta avanza a la siguiente etapa; si ambos la rechazan, se descarta del proceso. En caso de que existan discrepancias, cuando un revisor acepta el artículo y el otro la rechaza, uno de los expertos se debe encargar de descargar el artículo y, tras su análisis detallado, decidir si debe incluirse en la siguiente etapa. Este trabajo resulta en un total de 65 artículos aceptados, los cuales son resumidos mediante Notebook LM. Para resumir todo este proceso, se desarrolla un diagrama de flujo.

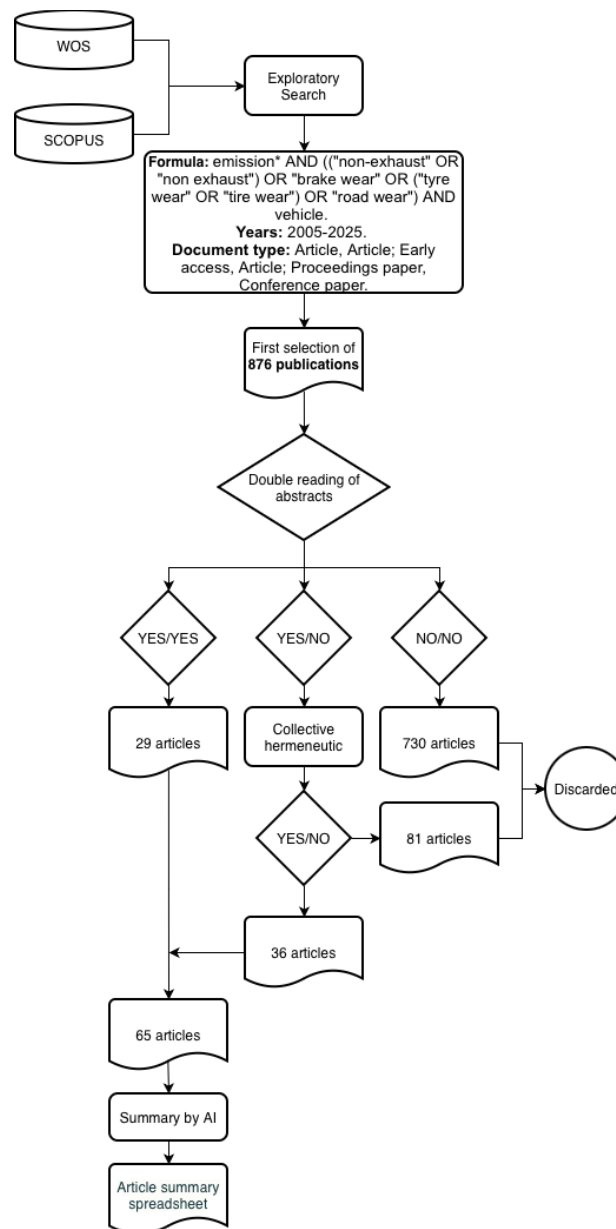
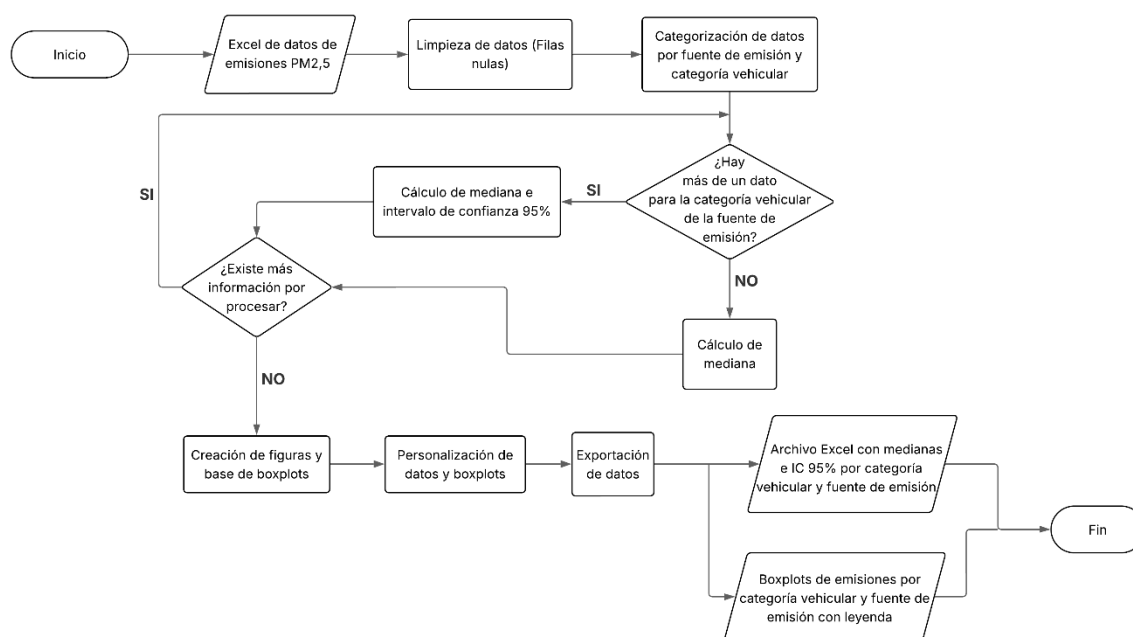


Figura 20: Diagrama de flujo de metodología PRISMA aplicada.

A través de los resúmenes entregados por la herramienta de inteligencia artificial, y una lectura manual de cada uno de los 65 artículos, se rescatan 18 artículos que contienen factores de emisión de PM_{2,5} para las distintas fuentes abrasivas por categoría vehicular.

De las 18 publicaciones, existen varios casos donde se evalúan muchos vehículos dentro de un mismo estudio, o casos donde las emisiones se evalúan en un freno o en un neumático solamente, por lo que a dichos valores se les aplican distintos factores dependiendo del caso, para transformarlos en emisiones totales vehiculares.

En el caso que las emisiones se obtengan mediante mediciones del freno delantero del vehículo, el valor se multiplica por un factor de 2,86 para obtener la emisión vehicular, asumiendo una distribución de emisiones del 70% para el freno delantero y 30% del freno trasero [39], obtenido a partir de la base que, al momento del frenado, el eje delantero sufre una mayor carga, forzando mayor fricción en sus frenos. En caso de que el factor de emisión entregado sea para un freno trasero, se usa un factor de 6,67. La única excepción de este cálculo se genera para los valores obtenidos de vehículos de carga pesada, las cuales incluye la categoría de buses de transporte, donde se asume que la carga por freno es repartida equitativamente, aplicándose un factor de 4 para transformar las emisiones por freno a emisiones vehiculares.



En cuanto al tema de las emisiones de carbono negro, se utiliza una variante de la fórmula anterior, esta vez siendo: *emissions AND ("non-exhaust" OR "non exhaust") OR "brake wear" OR ("tyre wear" OR "tire wear") OR "road wear") AND ("BC" OR "Black carbon")*.

a partir de dicha información, si es que el artículo posee la información necesaria para poder hacer la estimación. Para esta etapa se seleccionan 3 artículos, los cuales entregan distintas proporciones de carbono negro con respecto a la totalidad de PM_{2,5} generado para cada fuente abrasiva, y a toda esta información, se incluyen las proporciones obtenidas por EMEP (2024), específicamente los valores dentro de la Tabla 3, todo esto con el fin de poder calcular un promedio para cada fuente de desgaste y tener proporciones de carbono negro para cada fuente abrasiva y categoría vehicular.

El desarrollo de una metodología de búsqueda permite recopilar de manera completa la información disponible sobre emisiones de PM_{2,5} y carbono negro, lo que facilita obtener factores de emisión mejor fundamentados. Además, su implementación mediante códigos en Python proporciona las herramientas necesarias para organizar y clasificar los datos obtenidos mediante la revisión bibliográfica, y calcular factores de emisión según las distintas fuentes de desgaste y categorías vehiculares.

2.3. Obtención de actividad vehicular por categoría para Chile y Colombia

En cuanto a la información disponible con respecto a las emisiones en Chile, el artículo “High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990–2020” presenta la construcción del inventario más detallado sobre emisiones del transporte vial en Chile. El objetivo del artículo se centra en cuantificar y mapear, con alta resolución espacial, las emisiones de contaminantes como CO, NO_x, PM_{2,5}, BC y gases de efecto invernadero generados por vehículos entre 1990 y 2020. Para lograrlo, el estudio se basa en información oficial sobre el parque vehicular del país, estándares de emisión, consumo de combustibles y actividad vehicular [40].

Para el desarrollo de las estimaciones de emisiones, se obtiene información oficial gubernamental del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) acerca de la composición de la flota vehicular chilena, mediante datos de reportes anuales sobre la cantidad de vehículos por categoría vehicular y región. Estas categorías se agrupan y se hacen coincidir con las categorías vehiculares definidas por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) en la quinta versión de su programa para computar emisiones por transporte en carretera (COPERT), ya que esta última contiene información sobre los factores de emisión y consumo de combustible:

Tabla 17: Tabla comparativa interpretada de la equivalencia entre categoría vehiculares europeas y chilenas [40].

COPERT	INE	Código de categoría
Vehículos pasajeros (diésel y gasolina, M1)	Automóvil, vagoneta, jeep, taxi	LPV
Vehículos comerciales livianos (diésel y gasolina, N1)	Furgoneta, camioneta pickup, minibús	LCV
Bus urbano estándar, midibús	Bus, taxibús	UBS
Bus urbano articulado	Bus	UBA
Bus interurbano	Bus	ICB
Vehículo de carga pesada (rígido, ≤14 t)	Camión	LDT
Vehículo de carga pesada (rígido, 14-28 t)	Camión	MDT
Vehículo de carga pesada (rígido, > 28 t y articulado)	Camión, camión con remolque	HDT
Motocicletas	Motocicletas y similares	MOT

A partir de información del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT), y el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se realiza la distinción de las categorías vehiculares según el tipo de combustible que utiliza y la distribución vehicular en función de su tecnología de control de emisiones. La combinación de categorías de vehículos, tipos de combustible y estándares de emisión da como resultado un total de 70 tipos distintos de vehículos usados en el análisis de emisiones. Estos tipos de vehículos se distribuyen según cada región del país, diferenciando además si la actividad vehicular ocurre en zonas urbanas o interurbanas, utilizando información de un estudio previo de Osses et al. (2010) que entrega datos de su distribución regional.

Para calcular la actividad vehicular, el artículo utiliza la siguiente fórmula,

$$VKT = \sum_{i,j,k}^N N_{i,j,k} \cdot KM_{i,j,k}$$

donde $N_{i,j,k}$ es el número de vehículos del tipo i en la región j y en la categoría de carretera k (urbana o interurbana), y $KM_{i,j,k}$ son los kilómetros recorridos por año por los vehículos del tipo i , en la región j y en la categoría de carretera k . Los valores de kilometrajes vehiculares, que corresponden al segundo componente de la sumatoria, se obtienen a partir de estimaciones realizadas por estudios anteriores, para cada uno de los códigos de categoría mostrados en la Tabla 17.

Para estimar la actividad vehicular en Colombia se sigue la metodología del artículo “Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation” donde, primeramente, realiza agrupaciones espaciales de las divisiones políticas del país en función de los registros vehiculares, ventas de combustible, carreteras y población las cuales se pueden visualizar en la Figura 22.



Figura 22: Clasificación geográfica de divisiones políticas de Colombia en función de parámetros vehiculares.

Para obtener información vehicular del país, utilizan la base de datos disponible del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), el cual entrega toda la información disponible acerca de los vehículos operacionales y activos en Colombia, con información acerca de su clase, especificaciones técnicas básicas y la municipalidad en la cual fue registrada. El artículo rescata estos datos para su periodo de interés, aplicando factores de obsolescencia para obtener la flota activa de cada año. Al igual que para la metodología de Chile, las

categorías vehiculares presentadas por el RUNT se hacen coincidir con las categorías descritas por la versión 5,5 de COPERT para utilizar sus datos de consumo de combustible por categoría vehicular. Las equivalencias realizadas por el artículo se observan en la Tabla 18:

Tabla 18: Tabla comparativa interpretada de la equivalencia entre categoría vehiculares europeas y colombianas RUNT [41].

COPERT	Colombia RUNT	Clase vehicular
Vehículos pasajeros (diésel y gasolina)	Automóvil, SUV, jeep, taxi	PC
Vehículos comerciales livianos (gasolina)	Camiones pequeños	LCV
Bus urbano estándar, midibús	Bus	BUSES
Bus urbano articulado	Bus articulado	BUSES
Bus interurbano	Bus	BUSES
Vehículo de carga pesada (rígido, $\leq 7,5$ t)	Camión	HDV
Vehículo de carga pesada (rígido, 7,5-12 t)	Camiones, camiones tolva, camión con remolque	HDV
Vehículo de carga pesada (rígido, 12-14 t)	Camiones, camiones tolva, camión con remolque	HDV
Vehículo de carga pesada (rígido, 14-20 t)	Camiones, camiones tolva, camión con remolque	HDV
Vehículo de carga pesada (rígido, 20-26 t)	Camiones, camiones tolva, camión con remolque	HDV
Vehículo de carga pesada (rígido, 26-28 t)	Camiones, camiones tolva, camión con remolque	HDV
Motocicletas	Motocicleta, ciclomotor, cuadriciclo, cuatrimoto	MOT

Los valores de los kilometrajes anuales se extraen de la página web tucarro.com, donde se obtienen 27.776 datos los cuales se promediaron considerando la edad del vehículo, y que posteriormente se procesan para obtener los kilometrajes según cada agrupación espacial.

Para obtener los kilómetros totales viajados por cada categoría vehicular, se utiliza la siguiente fórmula:

$$VKT = \sum_{i,j}^N N_{i,j} \cdot KM_{i,j}$$

donde $N_{i,j}$ es el número de vehículos del tipo i en el clúster geográfico j , y $KM_{i,j}$ son los kilómetros anuales recorridos por los vehículos del tipo i en el clúster j .

Tanto para Chile como Colombia, se tienen que obtener valores de la cantidad total de vehículos y el kilometraje anual por agrupación espacial y categoría vehicular a partir de una base de datos recientes, y mediante la fórmula establecida anteriormente, obtener la actividad vehicular para cada categoría definida.

2.4. Metodología de cálculo de emisiones de PM_{2,5} y carbono negro

A partir de los factores de emisión calculados con la literatura inicial y la literatura obtenida mediante la aplicación de la metodología PRISMA, junto con la actividad vehicular calculada por categoría obtenida a partir de las bases de datos disponibles, se utiliza la siguiente fórmula para obtener las emisiones totales de PM_{2,5} para cada fuente abrasiva:

$$PM_{2,5} = \sum_{i,j}^n (EF_{i,j} \times VKT_i)$$

Donde $PM_{2,5}$ corresponde a las emisiones de PM_{2,5} totales del país, EF_i es el factor de emisión de la categoría vehicular i para el proceso abrasivo j , y AV_i es la actividad vehicular obtenida para la categoría vehicular i .

Para las emisiones de carbono negro, se deben aplicar los factores obtenidos de la Tabla 22, para cada producto de la sumatoria, llegando a la siguiente fórmula:

$$BC = \sum_{i,j}^n (EF_{i,j} \times VKT_i) \times fBC_{i,j}$$

Donde BC corresponde a las emisiones de carbono negro totales del país, EF_i es el factor de emisión de la categoría vehicular i para el proceso abrasivo j , AV_i es la actividad vehicular obtenida para la categoría vehicular i y $fBC_{i,j}$ es la fracción de carbono negro de la categoría vehicular i para el proceso abrasivo j .

Debido a que las bases de datos que contienen la información de actividad vehicular son muy grandes, se desarrolla un código Python, el cual agrupa a las categorías vehiculares de

las bases de datos y las modifica según las categorías vehiculares propias, similar a la metodología observada para la Tabla 17 y Tabla 18. Luego, agrupa los datos según la categoría vehicular y la región, sumando las actividades vehiculares de las distintas agrupaciones, para luego iterar sobre tanto las filas de la base de datos de la actividad vehicular, como las filas de la hoja Excel que contiene los factores de emisión por proceso abrasivo y categoría vehicular, asumiendo además que los factores se mantienen constantes en las regiones del país. Mediante la iteración, se realiza la multiplicación para obtener las emisiones de tanto PM_{2,5} como BC, categorizando el resultado en emisiones totales por región y emisiones totales del país en función de los tres procesos abrasivos. Los códigos usados para la base de datos de Chile y Colombia se pueden apreciar en el Anexo 2 y Anexo 3, respectivamente.

3. Resultados

3.1. Obtención de factores de emisión

Para la obtención de los factores de emisión actualizados y poder realizar la estimación de las emisiones de PM_{2,5} y carbono negro tanto para Chile como Colombia, se analiza una base de datos disponible, que incluye factores de emisión por Garg et al. (2000), CEPMEIP (2002) y US EPA (2020), a la cual se les agregan los factores de emisión de los distintos artículos encontrados a partir de la aplicación de la metodología PRISMA, donde sus valores se pueden observar en la Tabla 19.

Tabla 19: Recopilación bibliográfica a partir de base de datos antigua y metodología PRISMA.

Referencia	Fuente	Categoría Vehicular	Emisiones Freno [mg/km]	Emisiones Neumático [mg/km]	Emisiones Carretera [mg/km]
[42]	Garg et al. (2000)	LCV	5,53	-	-
		PC	2,11	-	-
[43]	CEPMEIP (2002)	HDV	32,30	-	-
		LCV	7,50	-	-
		MOT	3,00	-	-
		PC	6,00	-	-
[27]	Timmers y Achten (2016)	PC	2,20	2,90	3,10
		PC-EV	-	3,70	3,80
[44]	Kim et al. (2020)	PC	1,84	-	-
[45]	US EPA (2020)	HDV	6,32	1,86	-
		LCV	1,90	0,8	-
		MOT	1,00	0,4	-
		PC	1,70	0,8	-
[46]	Agudelo et al. (2021)	PC	1,13	-	-
[26]		PC	5,15	6,80	3,45

	Beddows & Harrison (2021)	PC-EV	5,65	7,35	3,90
[47]	Hesse et al. (2021)	PC	6,24	-	-
[48]	Tonegawa et al. (2021)	PC	-	3,73	-
[49]	Huber et al. (2022)	PC	3,36	-	-
[50]	Woo et al. (2022)	PC	3,20	-	-
		PC-EV	1,18	-	-
[37]	Grigoratos et al. (2023)	PC	6,25	-	-
		LCV	10,00	-	-
[51]	Huber et al. (2023)	PC	4,00	-	-
[33]	Lee et al. (2023)	HDV	21,54	-	-
[36]	Storch et al. (2023)	PC	7,40	-	-
		PC-EV	2,29	-	-
[52]	Tivey et al. (2023)	BUS	14,04	19,98	18,68
[53]	Andersson et al. (2024)	PC	3,60	-	-
[29]	EMEP (2024)	HDV	-	-	20,50
		LCV	5,75	5,80	4,90
		MOT	1,40	1,90	1,60
		PC	3,56	4,50	4,00
		PC-EV	1,37	4,87	4,57
[54]	Hagino et al. (2024)	PC	2,65	-	
[55]	Q. Zhang et al. (2024)	PC	2,66	0,21	-
[34]	Yin et al. (2025)	PC	4,30	-	-
		PC-EV	0,54	-	-
		BUS	32,20	-	-
		HDV	33,20	-	-

El recopilatorio bibliográfico proporciona información acerca de los factores de emisión para vehículos de carga pesada (HDV), vehículos comerciales livianos (LCV), motocicletas (MOT), y vehículos pasajeros, tanto a combustible (PC) como eléctricos (PC-EV). Los factores de emisión recopilados se integran al código Python ubicado en el Anexo 1, que analiza los valores de cada fuente, y los agrupa según la categoría vehicular y la fuente de desgaste a la cual pertenece, agrupando los factores de emisión de buses (BUS) dentro de la categoría de vehículos pesados (HDV) debido a que, por su similitud en peso, se obtienen factores similares para los tres procesos abrasivos. A partir del código Python, se obtienen las medianas de los factores de emisión para cada una de las agrupaciones mencionada y

fuentes abrasivas. Esta información se procesa con el fin de tener los diagramas de cajas de bigotes de las emisiones PM_{2,5} para cada categoría vehicular y proceso abrasivo, destacando el intervalo de confianza del 95% para cada grupo de datos.

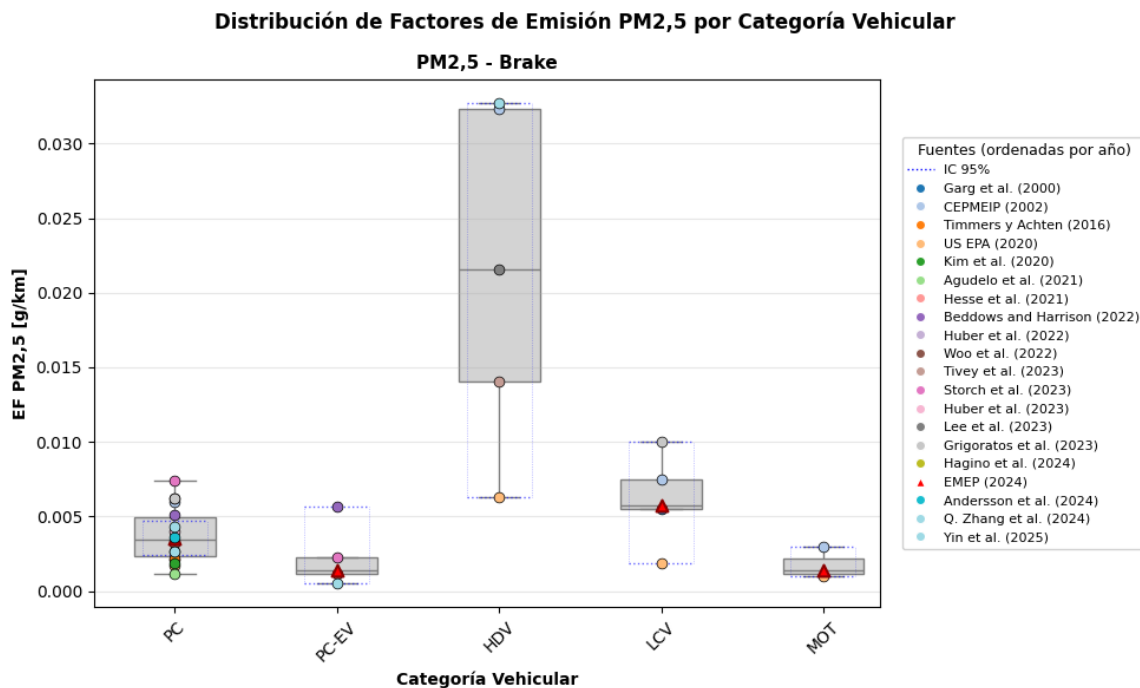


Figura 23: Diagrama de cajas de PM_{2,5} por desgaste de frenos para cada categoría vehicular.

Mediante la información de los diagramas de cajas, se observa una gran diferencia entre la cantidad de datos disponibles en la literatura entre el desgaste de freno y el desgaste de tanto neumáticos como carreteras, donde para estos dos últimos procesos abrasivos, la información de EMEP (2024) toma un papel muy importante al ser uno de los pocos estudios que entregan información acerca de sus emisiones para las cinco categorías vehiculares definidas. Los valores de las medianas y los intervalos de confianza del 95% para cada grupo vehicular y fuente abrasiva se puede observar en la Tabla 20.

Tabla 20: Factores de emisión PM_{2,5} para categorías y fuentes abrasivas definidas con intervalo de confianza del 95%.

Categoría vehicular	Fuente	Factor de emisión [g/km]	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
HDV	Freno	0,0215	0,0063	0,0327
	Neumático	0,0109	0,0019	0,0200
	Carretera	0,0196	0,0187	0,0205
LCV	Freno	0,0058	0,0019	0,0100
	Neumático	0,0058	-	-
	Carretera	0,0049	-	-
MOT	Freno	0,0014	0,0010	0,0030
	Neumático	0,0012	0,0004	0,0019
	Carretera	0,0016	-	-
PC	Freno	0,0035	0,0024	0,0047
	Neumático	0,0033	0,0005	0,0057
	Carretera	0,0035	0,0031	0,0040
PC-EV	Freno	0,0014	0,0005	0,0057
	Neumático	0,0049	0,0037	0,0074
	Carretera	0,0039	0,0038	0,0046

En el caso de los factores de emisión de carretera de los vehículos comerciales livianos y motocicletas, no se calculan intervalos de confianza ya que solamente existen datos de una fuente de información.

Para encontrar la información necesaria y poder realizar una estimación carbono negro, se sigue la metodología explicada en la sección 2.2, a través de la cual se obtienen proporciones de carbono negro en PM_{2,5} de los artículos seleccionados, mostrándose las fuentes utilizadas y sus valores en la Tabla 21:

Tabla 21: Recopilación bibliográfica de fracciones de carbono negro para emisiones de freno, neumático y carretera.

Referencia	Fuente	Categoría Vehicular	Fracción BC Freno	Fracción BC Neumático	Fracción BC Carretera
[56]	Zhang et al. (2020)	General	4,30%	-	-
[57]	Woo et al. (2022)	PC NAO	1,46%	-	-
		PC LM	5,5%		
[58]	Sarica et al. (2023)	General	2,60%	15,30%	-
[29]	EMEP (2024)	HDV	10,00%	10,00%	1,06%
		LCV	10,00%	10,00%	1,06%
		MOT	12,00%	12,00%	1,06%
		PC	10,00%	10,00%	1,06%
		PC-EV	10,00%	10,00%	1,06%

Se destaca que, dentro de la columna de “Categoría Vehicular” las celdas que contienen el término “General” alude que la fracción de carbono negro se obtiene de una flota mixta y que su valor se utiliza para cada una de las categorías vehiculares definidas, mientras que “PC NAO” Y “PC LM” corresponden a materiales de pastilla de freno orgánicos y de bajo contenido metálico, respectivamente, para vehículos pasajeros. Para el caso de EMEP (2024), los valores propuestos para vehículos pasajeros se consideran tanto para la categoría PC como PC-EV, ya que ambas técnicamente pertenecen a la categoría de vehículo liviano.

Los valores obtenidos se promedian para finalmente obtener proporciones generalizadas para cada tipo de vehículo y fuente de desgaste:

Tabla 22: Fracciones de carbono negro con respecto a PM_{2,5} totales para cada categoría vehicular y fuente de desgaste abrasiva.

Estimación proporción BC		
Fuente	Categoría	Proporción
Freno	HDV	5,63%
	LCV	5,63%
	MOT	6,30%
	PC	4,77%
	PC-EV	4,77%
Neumático	HDV	12,65%
	LCV	12,65%
	MOT	13,65%
	PC	12,65%
	PC-EV	12,65%
Carretera	HDV	1,06%
	LCV	1,06%
	MOT	1,06%
	PC	1,06%
	PC-EV	1,06%

Se logran calcular factores de emisión y proporciones de carbono negro para cada una de las categorías vehiculares definidas, observándose intervalos de confianza del 95% más amplios para las emisiones de neumático y carretera especialmente. La falta de datos para estas dos fuentes abrasivas y las diferencias entre los valores de los factores de emisión obtenidos para las mismas categorías vehiculares justifica el uso de las medianas de los datos para realizar una estimación más acertada.

3.2. Estimación de emisiones para Chile

Para el caso de Chile, mediante una base de datos que contiene la actividad vehicular total por categoría vehicular, distinguiendo entre tamaño de vehículo, norma euro y región, se realiza una equivalencia de las categorías vehiculares en dicha base, con las categorías

definidas para la estimación a realizar, donde sus resultados se pueden observar en la Tabla 23.

Tabla 23: Equivalencia de categorías entre base de datos de Chile y estimación TIER 2.

Categorías de base de datos para Chile	Categorías de estimación
VLP, TAX	PC/PC-EV
VLC	LCV
MOT	MOT
CAM LIV, CAM MED, CAM PES	HDV
BUS ART, BUS INT PROV, BUS RIG	HDV

En el caso de los vehículos pasajeros (VLP) y taxis (TAX), los vehículos eléctricos estaban identificados en la base de datos dentro de la categorización por norma, donde solamente en el caso en que la celda indique “Eléctrico”, se consideraba dicha actividad vehicular como parte de la categoría propia de vehículo eléctrico pasajero (PC-EV).

Realizando la equivalencia, se utiliza el código Python explicado en la sección 2.4, con el fin de manipular los datos y aplicar las fórmulas de estimación ubicadas en la misma sección. La base de datos incluye información desde el 1990 hasta el 2050, pero se considera ideal hacer una evaluación entre los años 1990 y 2025 para observar la evolución de las emisiones vehiculares a medida que varía la cantidad de vehículos circulando y se modifica la tecnología vehicular hasta el presente.

Tabla 24: Nivel de emisiones de PM2,5 y BC en función del tiempo para Chile.

Año	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
PM2.5 [Gg/año]	0,427	0,637	0,801	0,878	1,200	1,383	1,476	1,862
BC [Gg/año]	0,025	0,038	0,048	0,052	0,071	0,082	0,088	0,111

Con fin de poder visualizar los valores exactos obtenidos para los años de mayor interés, se desarrolla la Tabla 24, la cual entrega las emisiones totales de carbono negro y PM2,5 calculadas para Chile.

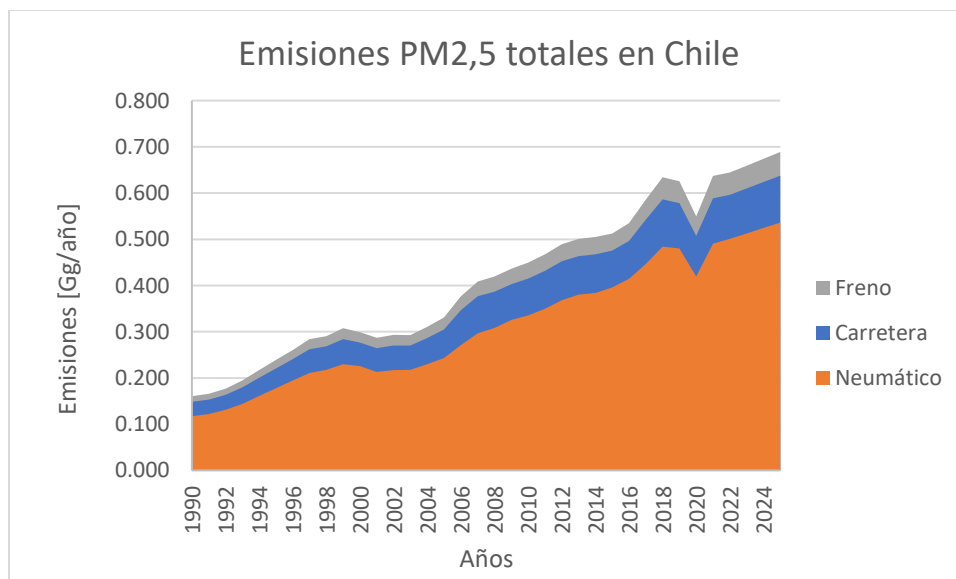


Figura 26: Emisiones de PM2,5 para cada proceso abrasivo en Chile (1990-2025).

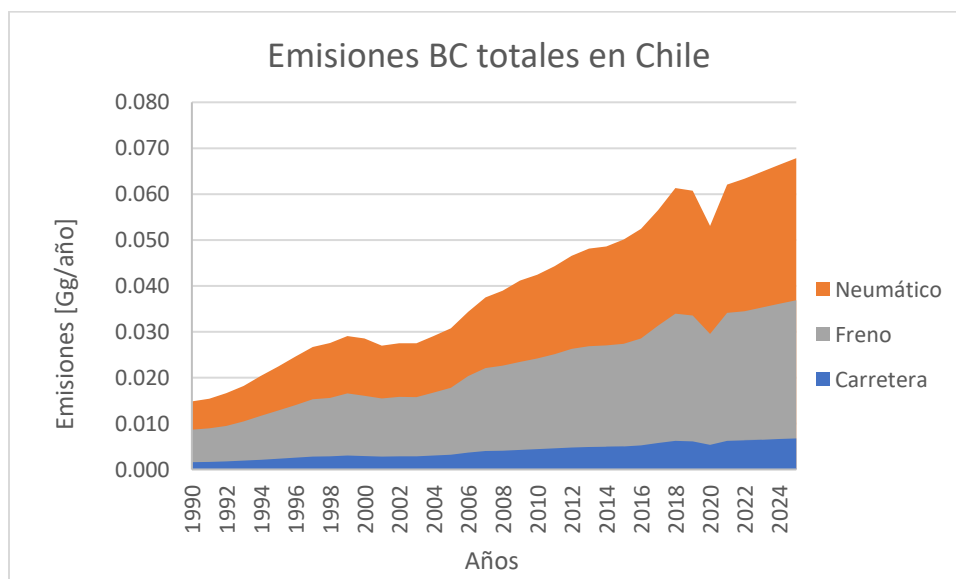


Figura 27: Emisiones de carbono negro para cada proceso abrasivo en Chile (1990-2025).

En la Figura 26 se puede observar un aumento constante de las emisiones de cada fuente abrasiva, obteniéndose que, en el año 2025, se emiten 0,689 [Gg]; 0,536 [Gg] y 0,637 [Gg] de PM2,5 y 0,037 [Gg]; 0,068 [Gg] y 0,007 [Gg] de carbono negro, mediante el desgaste de frenos, neumáticos y carreteras, respectivamente.

Las emisiones estimadas están fuertemente relacionadas a la cantidad creciente de vehículos circulando, viéndose una baja para el año 2020 debido a la situación de pandemia. En cuanto al futuro de las emisiones de freno, se espera que estas empiecen a disminuir a medida que vaya incrementando la participación de vehículos eléctricos dentro de la flota a

nivel país, mientras que, en el caso de neumáticos y carretera, habrá un aumento constante de sus emisiones, ya que dependen mucho del peso vehicular, a no ser que se hagan cambios en la tecnología, ya sea a través del desarrollo de neumáticos y carreteras con materiales más resistentes al desgaste.

En la Figura 27 se observan claras diferencias entre las emisiones de carbono negro entre los tres procesos abrasivos, ya que se encuentran directamente relacionadas a la cantidad de carbono negro utilizado para la fabricación de los elementos que interactúan en el proceso de desgaste. Se induce que, mientras más carbono negro hay en el material, mayor va a ser la participación del contaminante dentro de las emisiones totales de PM_{2,5}, evidenciándose el comportamiento de las curvas de la Figura 27 acorde a las proporciones de carbono negro utilizadas en la Tabla 22.

En la Figura 28 y Figura 29 se pueden distinguir los distintos comportamientos que han tenido las emisiones por desgaste abrasivo y las emisiones por tubo de escape a lo largo de los años.

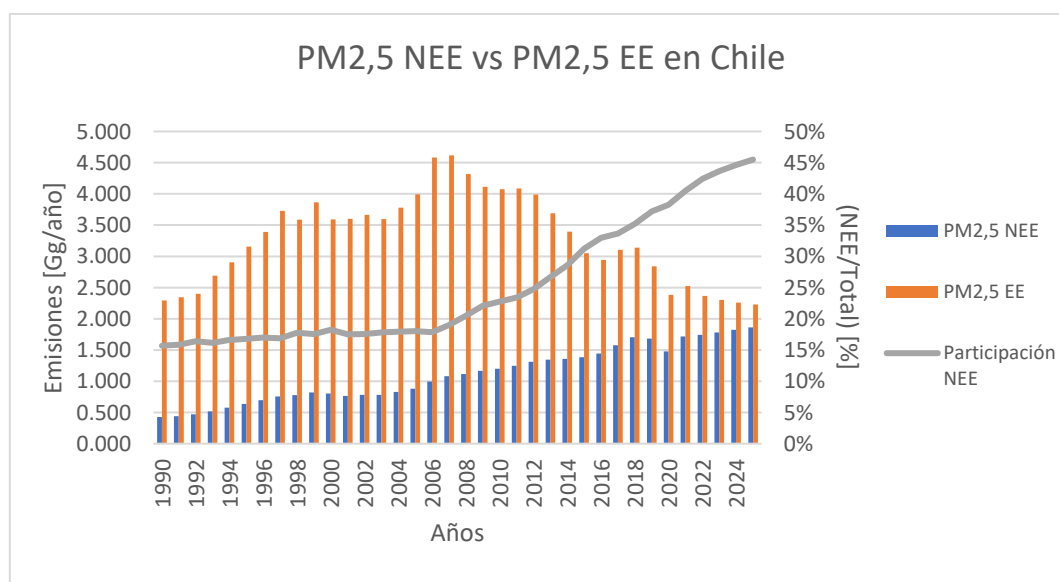


Figura 28: Gráfico comparativo de emisiones totales de PM_{2,5} abrasivas y de escape en Chile, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido (1990-2025).

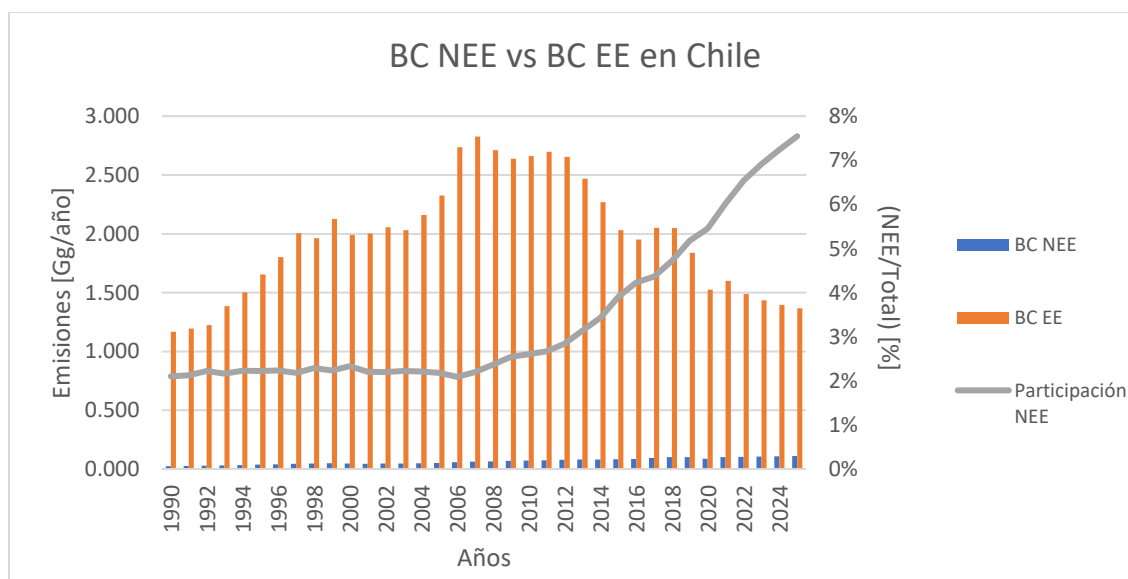


Figura 29: Gráfico comparativo de emisiones totales de carbono negro abrasivos y de escape en Chile, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido (1990-2025).

Se puede visualizar que desde el año 1990 hasta el 2006 hay un incremento de las emisiones de material particulado por tubo de escape, principalmente por el crecimiento industrial y vehicular, sin conocimiento acerca del efecto ambiental que provocan. Desde el 2007 se observa una disminución de las emisiones del PM_{2,5} producidas por combustión, debido al desarrollo de nuevas tecnologías de mitigación de emisiones, que resultaron en este comportamiento, pese al incremento anual de vehículos circulando dentro del país. Para el caso de PM_{2,5} y BC por desgaste abrasivo, se observa un comportamiento creciente esperado, causado directamente por el incremento anual del VKT total del país.

Para el PM_{2,5}, se observa que las emisiones generadas por procesos abrasivos vehiculares corresponden al 15,7% de las emisiones totales de PM_{2,5} en el año 1990, mientras que, en el 2025, el porcentaje llega casi un triple, siendo de 45,5%.

En el caso del carbono negro, las emisiones por procesos abrasivos corresponden a 2,1% del total de emisiones de BC en 1990, y en el 2025, alcanza un 7,5% del total.

Las curvas de porcentaje de participación de las emisiones abrasivas indican tendencias de crecimiento muy bruscas, observándose que en los próximos años las emisiones de PM_{2,5} por abrasión superarán a las emisiones por tubo de escape, y en proyecciones a largo plazo, el carbono negro por abrasión tomará mayor importancia.

3.3. Estimación de emisiones para Colombia

Para la estimación de Colombia, se utiliza la base de datos disponible de la Universidad Nacional de Colombia, en su sede de Bogotá, la cual fue creada para un artículo de emisiones de transporte y realiza una categorización de vehículos según tamaño, conteniendo información de kilómetros totales viajados anualmente desde el 1990 hasta el 2025. Esta base de datos clasifica los vehículos pasajeros y comerciales livianos por tamaño, por lo que se opta hacer una categorización de los factores de emisión estimados ajustados a los tamaños definidos. Para realizar esto, la categorización por tamaño se define mediante el análisis de los factores de emisión de EMEP (2024), donde, a partir de sus valores según el tamaño vehicular, se calcula una proporción, utilizando el tamaño mediano como base, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 25: Proporciones de factor de emisión en función de tamaño vehicular.

Contaminante	Categoría	Tamaño	Proporciones		
			Freno	Neumático	Carretera
MP2.5/BC	Motocicletas (MOT)	Todos	1,000	1,000	1,000
MP2.5/BC	Vehículos pasajeros (PC)	Mini	0,836	0,897	0,847
		Pequeño	0,672	0,794	0,700
		Mediano	1,000	1,000	1,000
		Grande	1,172	1,103	1,160
MP2.5/BC	Vehículos pasajeros eléctricos (PC-EV)	Pequeño	0,857	0,905	0,858
		Mediano	1,000	1,000	1,000
		Grande	1,143	1,095	1,148
MP2.5/BC	Vehículos comerciales livianos (LCV)	Pequeño	0,827	0,775	0,833
		Mediano	1,000	1,000	1,000
		Grande	1,173	1,224	1,167
MP2.5/BC	Vehículos de carga pesada (HDV)	Todos	1,000	1,000	1,000

Las proporciones obtenidas en la Tabla 25 se aplican en los factores de emisión calculados en la Tabla 20, con el fin de tener factores más acordes al tamaño vehicular y no hacer una sobreestimación de las emisiones totales del país. Los resultados de dicho procedimiento se observan en la Tabla 26.

Tabla 26: Factores de emisión en distintas fuentes abrasivas por categoría y tamaño vehicular (TIER 3).

Categoría	Tamaño	Factor de emisión [g/km]					
		PM2,5			BC		
		Freno	Neumático	Carretera	Freno	Neumático	Carretera
Motocicletas (MOT)	Todos	0,0014	0,0012	0,0016	0,00009	0,00016	0,00002
Vehículos pasajeros (PC)	Pequeño	0,0029	0,0030	0,0029	0,00014	0,00038	0,00003
	Mini	0,0023	0,0026	0,0024	0,00011	0,00033	0,00003
	Mediano	0,0035	0,0033	0,0035	0,00017	0,00042	0,00004
	Grande	0,0041	0,0037	0,0040	0,00019	0,00046	0,00004
Vehículos pasajeros eléctricos (PC-EV)	Pequeño	0,0012	0,0044	0,0033	0,00006	0,00056	0,00004
	Mediano	0,0014	0,0049	0,0039	0,00007	0,00062	0,00004
	Grande	0,0016	0,0053	0,0045	0,00007	0,00067	0,00005
Vehículos comerciales livianos (LCV)	Pequeño	0,0048	0,0045	0,0041	0,00027	0,00057	0,00004
	Mediano	0,0058	0,0058	0,0049	0,00032	0,00073	0,00005
	Grande	0,0067	0,0071	0,0057	0,00038	0,00090	0,00006
Vehículos de carga pesada (HDV)	Todos	0,0215	0,0109	0,0196	0,00121	0,00138	0,00021

Al igual que en la metodología de Chile, se realiza una equivalencia de las categorías vehiculares de la base de datos universitaria, para ajustarlas a las categorías definidas en la base de datos de la universidad, observándose esta equivalencia en la Tabla 27:

Tabla 27: Equivalencia de categorías entre base de datos de Colombia y estimación TIER 2.

Categorías de datos VKT para Colombia	Categorías de estimación
Buses	HDV
Heavy Duty Vehicles	HDV
L-Category	MOT
Passenger cars	PC
Light Commercial Vehicles	LCV

Dentro de la base de datos de la Universidad Nacional de Colombia no se identifica información con relación a vehículos eléctricos, por lo que se omite el uso de los factores obtenidos para dicha categoría. Además, para el caso de los vehículos comerciales livianos,

la base de datos solamente tiene los VKT para vehículos de gran tamaño, por lo que se utilizan únicamente los factores de emisión obtenidos para vehículos comerciales livianos grandes en la Tabla 26.

Mediante un código Python, el cual se puede visualizar de manera completa dentro del Anexo 3, se obtienen las emisiones anuales desde el año 1990 hasta el 2025, pudiéndose visualizar las emisiones totales de PM2,5 y BC en intervalos de 5 años en la Tabla 28.

Tabla 28: Nivel de emisiones de PM2,5 y BC en función del tiempo para Colombia.

Año	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
PM2.5 [Gg/año]	1,243	1,481	1,300	1,323	1,506	1,914	1,924	2,377
BC [Gg/año]	0,070	0,084	0,074	0,075	0,086	0,109	0,111	0,137

En la Figura 30 y Figura 31, se puede visualizar el comportamiento del PM2,5 y BC por proceso abrasivo, respectivamente.

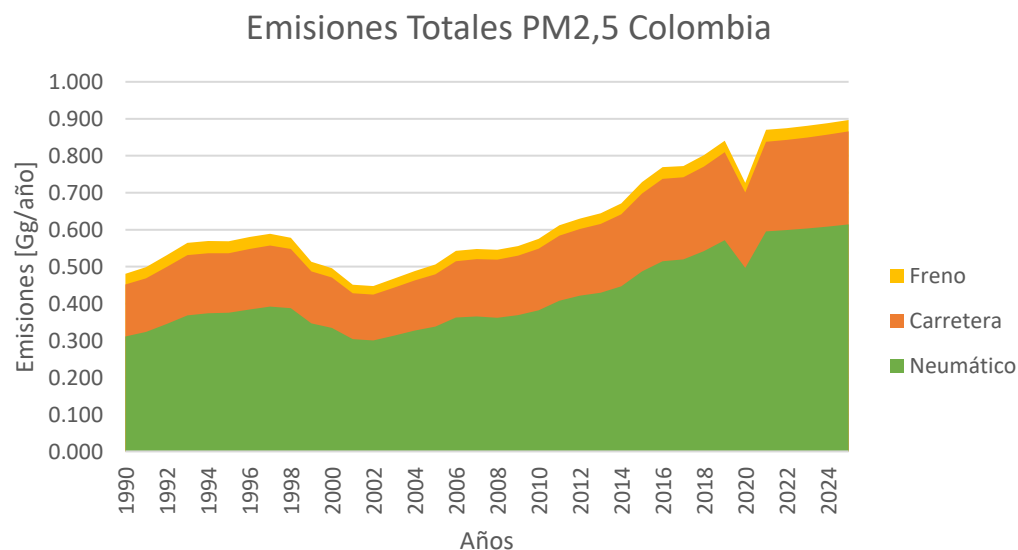


Figura 30: Emisiones de PM2,5 estimadas para Colombia según cada fuente abrasiva entre los años 1990 y 2025.

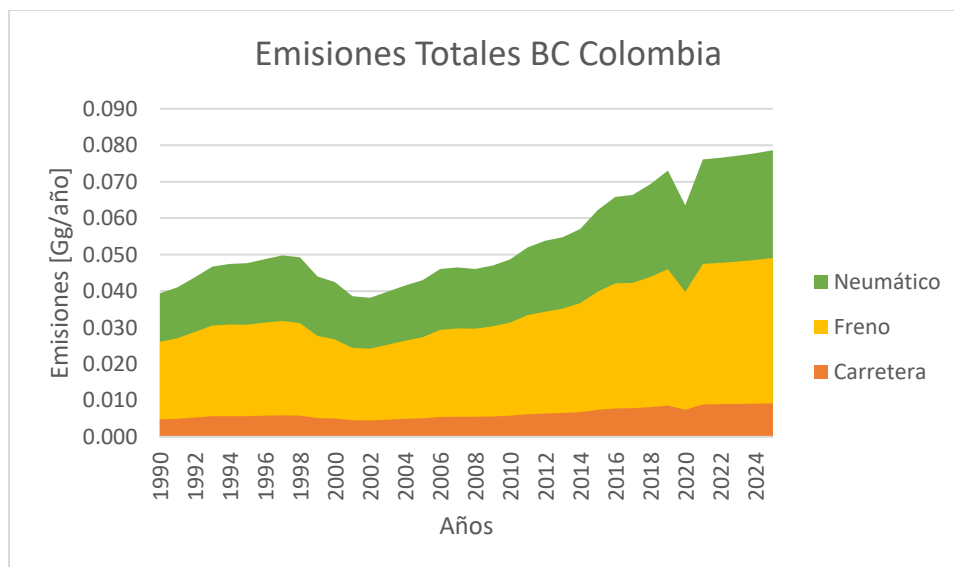


Figura 31: Emisiones de BC estimadas de Colombia para cada fuente abrasiva entre los años 1990 y 2025.

Al igual que en el caso de Chile, se observa una leve predominancia de las emisiones de freno por sobre los demás procesos abrasivos, y en la Figura 31, también se observa un comportamiento similar a las emisiones de carbono negro en Chile, debido a que en ambos casos se utilizan las mismas proporciones con respecto al total de PM_{2,5}. Se obtiene que, en el año 2025, se emiten 0,897 [Gg]; 0,614 [Gg] y 0,866 [Gg] de PM_{2,5}, y para carbono negro, 0,049 [Gg]; 0,079 [Gg] y 0,009 [Gg] mediante el desgaste de frenos, neumáticos y carreteras, respectivamente.

En la Figura 32 y Figura 33 se pueden comparar visualmente las emisiones de tubo de escape y desgaste abrasivo para PM_{2,5} y carbono negro, respectivamente.

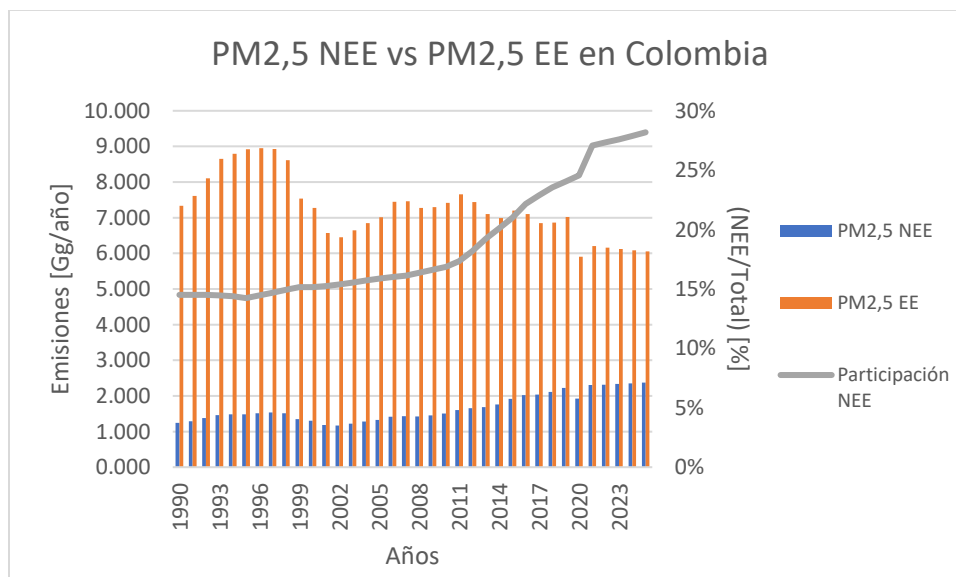


Figura 32: Comparación entre PM2,5 totales de procesos abrasivos y emisiones por tubo de escape en Colombia a través de los años, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido (1990-2025).

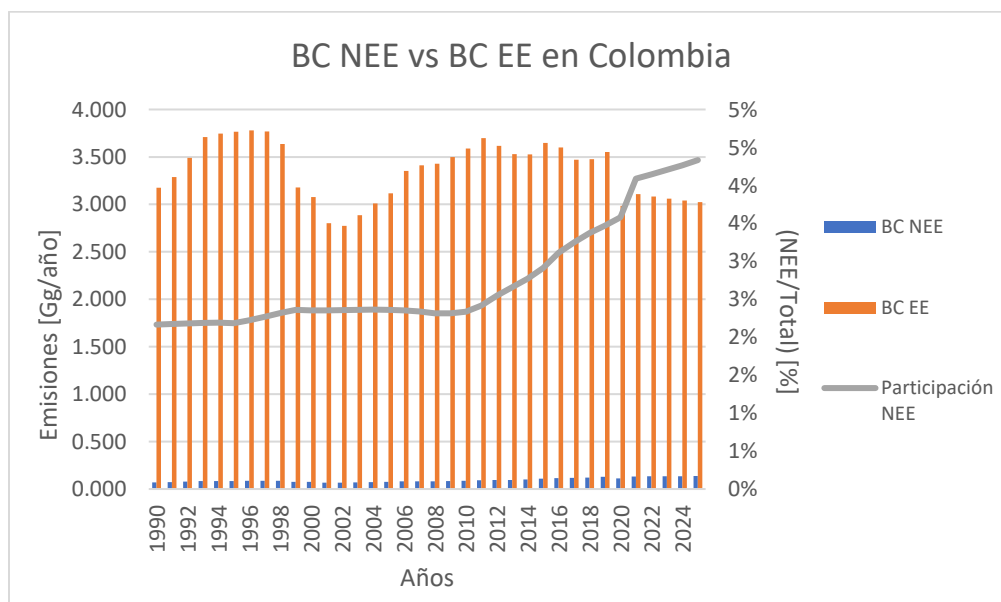


Figura 33: Comparación entre BC totales de procesos abrasivos y emisiones por tubo de escape en Colombia, junto con una curva de porcentaje de participación del contaminante con respecto al total emitido a través de los años (1990-2025).

Al igual que las emisiones de Chile, ambas figuras presentan las mismas tendencias analizadas desde el año 2000, destacándose la disminución progresiva de las emisiones por tubo de escape y el incremento constante de las emisiones por procesos abrasivos vehiculares, causando que la proporción de contaminantes abrasivos tomen mayor participación dentro de las emisiones totales.

En el año 1990, las emisiones de PM_{2,5} abrasivas son de 1,243 [Gg] mientras que las emisiones por tubo de escape son de 7,332 [Gg], donde las emisiones abrasivas componen el 14,5% del total. En el año 2025, se obtienen emisiones abrasivas de 2,377 [Gg] mientras que las emisiones por escape alcanzan emisiones de 6,056 [Gg], donde las emisiones por abrasión ocupan un 28,2% del total de PM_{2,5}.

Para las emisiones de BC, en el año 1990, las emisiones abrasivas son de 0,070 [Gg] mientras que las emisiones por tubo de escape son de 3,175 [Gg], donde las emisiones abrasivas componen el 2,2% del total. En el año 2025, se obtienen emisiones de 0,137 [Gg] por abrasión, mientras que las emisiones por escape alcanzan emisiones de 3,022 [Gg], donde las emisiones por abrasión ocupan un 4,3% de las emisiones totales de carbono negro.

3.4. Comparación de emisiones entre Chile y Colombia

Mediante la Tabla 29 se puede comparar las emisiones de ambos contaminantes en intervalos de 5 años, incluyendo un cálculo del índice de emisiones presentes en Colombia con respecto a las emisiones calculadas para Chile.

Tabla 29: Comparativa porcentual entre emisiones totales de PM_{2,5} y BC entre Chile y Colombia en intervalos de cinco años.

Año	Contaminante	Emisiones [Gg/año]		Proporción Colombia/Chile
		Países		
		Chile	Colombia	
1990	PM2,5	0,427	1,243	2,91
	BC	0,025	0,070	2,80
1995	PM2,5	0,637	1,481	2,32
	BC	0,038	0,084	2,21
2000	PM2,5	0,801	1,300	1,62
	BC	0,048	0,074	1,54
2005	PM2,5	0,878	1,323	1,51
	BC	0,052	0,075	1,44
2010	PM2,5	1,200	1,506	1,26
	BC	0,071	0,086	1,21
2015	PM2,5	1,383	1,914	1,38
	BC	0,082	0,109	1,33
2020	PM2,5	1,476	1,924	1,30
	BC	0,088	0,111	1,26
2025	PM2,5	1,862	2,377	1,28
	BC	0,111	0,137	1,23

Se observa que, en el año 1990, las emisiones de Colombia son casi el triple de las emisiones de Chile, y desde el año 2010, a medida que se desarrollaron nuevas tecnologías vehiculares y se implementaron en ambos países, las proporciones se estabilizaron, llegando

a que las emisiones de Colombia son entre 1,2 y 1,4 veces más que las emisiones en Chile, viéndose afectado principalmente por factores como población y densidad vehicular.

Para visualizar el comportamiento de las emisiones año tras año, se desarrolla la Figura 34 para PM_{2,5} y la Figura 35 para el carbono negro.

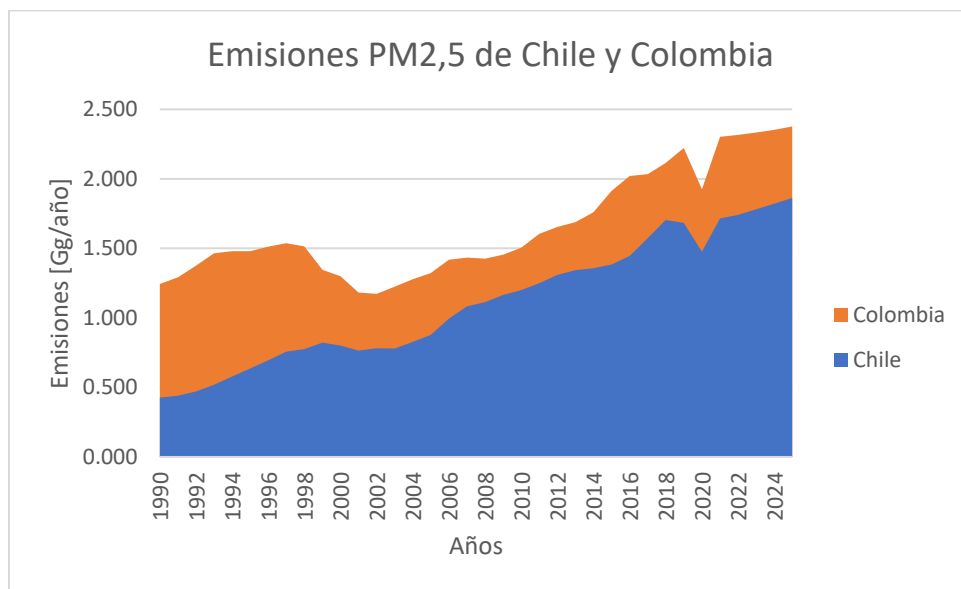


Figura 34: Comparación de emisiones PM_{2,5} por desgaste abrasivo entre Chile y Colombia.

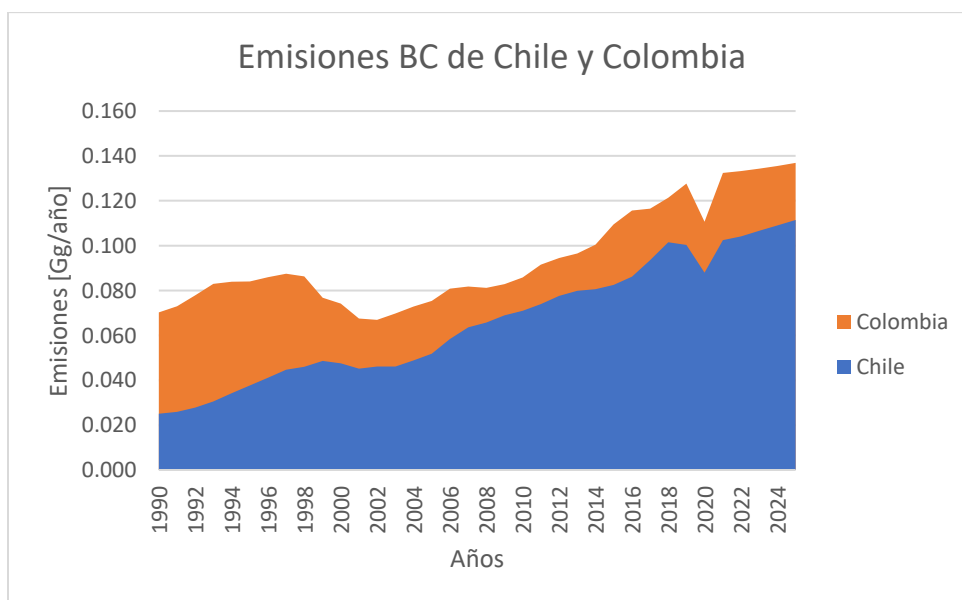


Figura 35: Comparación de emisiones de carbono negro por desgaste abrasivo entre Chile y Colombia.

Se observa para ambas figuras que, para los primeros años de evaluación, las emisiones en Colombia son bastante superiores que las emisiones en Chile, destacándose un índice de 2,911 y 2,800 para PM_{2,5} y BC en el año 1990, respectivamente. Luego, desde el año 2000, el índice de proporción de emisiones se estabiliza. Las emisiones en Colombia son mayores ya que tienen una población más alta que en Chile, lo cual induce a una mayor cantidad de vehículos circulando dentro del país, y, por ende, una actividad vehicular mayor.

Al observar la Figura 28, se aprecia que la curva de emisiones por escape y por desgaste siguen una tendencia que indica que, en los próximos años, las emisiones por desgaste serán superiores. Por su parte, en la Figura 32 y Figura 33, correspondiente a Colombia, la curva de porcentaje de emisiones abrasivas en emisiones totales es más baja en comparación con los porcentajes de participación observados para Chile. Esta divergencia podría explicarse, en parte, por la influencia de la población. Pero el factor que afecta en mayor medida es la composición de la flota vehicular. Colombia se caracteriza por tener una flota vehicular antigua, predominada por vehículos entre las normas Euro 2 y Euro 3, lo cual significa que la tecnología de mitigación de emisiones en la mayoría de los vehículos de la flota no es actual, por lo que las emisiones por tubo de escape incrementan en gran medida, a diferencia de la flota chilena, la cual tiene una participación considerable de vehículos Euro 6.

4. Conclusiones

4.1. Conclusión general

Se logra cumplir el objetivo general de estimar las emisiones de PM_{2,5} y carbono negro mediante factores de emisión obtenidas a partir de una revisión bibliográfica metódica y el cálculo de la actividad vehicular mediante las bases de datos disponibles de cada país.

Para vehículos de carga pesada (HDV), vehículos comerciales livianos (LCV), motocicletas (MOT), vehículos pasajeros convencionales (PC) y eléctricos (PC-EV), se obtienen factores de emisión de 0,0215; 0,0058; 0,0014; 0,0035 y 0,0014 [g/km] para frenos, 0,0109; 0,0058; 0,0012; 0,0030; 0,0049 [g/km] para neumáticos, y 0,0196; 0,0049; 0,0016; 0,0035 y 0,0039 [g/km] para emisiones por desgaste de carpeta rodante, respectivamente.

Para emisiones de carbono negro se obtienen proporciones del contaminante con respecto al total de PM_{2,5}, obteniéndose un 5,63% en HDV y LCV; 6,30% en MOT y 4,77% tanto en PC como PC-EV para frenos. En neumáticos se obtiene una proporción de 13,65% para MOT y 12,65% para las categorías restantes, mientras que, para carreteras, se aplica una proporción de 1,06% para todas las categorías vehiculares definidas.

Para Chile se obtiene que las emisiones del año 2025 alcanzan valores de 0,689 [Gg]; 0,536 [Gg] y 0,637 [Gg] de PM_{2,5}, mientras que, para el carbono negro se obtienen valores de 0,037 [Gg]; 0,068 [Gg] y 0,007 [Gg] por desgaste de frenos, neumáticos y carreteras, respectivamente. Al incluir las emisiones por tubo de escape, las emisiones de PM_{2,5} por desgaste representan el 45,5% del total, y las emisiones de carbono negro por abrasión componen el 7,5%.

En Colombia, para el 2025 se obtienen emisiones de 0,897 [Gg]; 0,614 [Gg] y 0,866 [Gg] para PM_{2,5}, y para carbono negro; 0,049 [Gg]; 0,079 [Gg] y 0,009 [Gg], por desgaste de frenos, neumáticos y carreteras, respectivamente. Para el mismo año, las emisiones por desgaste conforman un 28,2% y 4,3% del total, para PM_{2,5} y BC, respectivamente.

Mediante una comparación de las emisiones totales entre Chile y Colombia para el año 2025, se obtiene un índice de 1,28 y 1,23 para las emisiones de Colombia con respecto a las emisiones de Chile, de PM_{2,5} y carbono negro, respectivamente.

4.2. Conclusiones específicas

El desgaste de frenos es una fuente importante de material particulado, determinada por el diseño del sistema, la composición de las pastillas y los discos, y las condiciones de operación. La fricción propia del frenado genera emisiones relevantes de PM_{2,5}, especialmente en entornos urbanos. En general, mientras mayor es la potencia de frenado requerida, mayor es la cantidad de partículas liberadas; por ello, en vehículos de mayor peso se espera un nivel de emisión más elevado.

El desgaste de neumáticos depende fuertemente del material, la temperatura, la velocidad, presión de inflado y condiciones de carretera. Este proceso aporta cantidades importantes de partículas, especialmente a altas velocidades y bajo condiciones de manejo exigentes.

Se observa que el deterioro de la carretera, además de depender de su composición material, se encuentra directamente relacionado con el nivel de tráfico del sector, particularmente en vías con alto flujo de vehículos pesados y avenidas con alta densidad de tráfico.

La transición hacia vehículos eléctricos reduce las emisiones por escape, pero no elimina las emisiones de desgaste abrasivo, no solucionando el problema de las emisiones de material particulado en su totalidad. Aunque los vehículos eléctricos tienen un peso mayor que los vehículos de combustión convencional, su sistema de frenado regenerativo reduce significativamente la carga sobre los frenos durante la conducción, emitiendo menos material particulado que el vehículo convencional. En contraste, las emisiones asociadas al desgaste de neumáticos y de la carretera tienden a aumentar, ya que dependen directamente del peso del vehículo.

La investigación inicial de literatura indica que existe una variabilidad considerable entre los estudios recientes, tanto en metodologías como en los factores de emisión entregados. Sin embargo, la evidencia coincide en que las emisiones por desgaste abrasivo representan una proporción creciente del material particulado total y requieren mayor estandarización metodológica.

El desarrollo de una metodología de búsqueda permite recopilar de manera completa la información disponible sobre emisiones de PM_{2,5} y carbono negro, lo que facilita obtener factores de emisión mejor fundamentados. Además, su implementación mediante códigos en Python proporciona las herramientas necesarias para organizar y clasificar los datos obtenidos mediante la revisión bibliográfica, y calcular factores de emisión según las distintas fuentes de desgaste y categorías vehiculares.

Tanto para Chile, como Colombia, es necesario obtener valores de la cantidad total de vehículos y el kilometraje anual por agrupación espacial y categoría vehicular, a partir de una base de datos recientes para obtener la actividad vehicular de cada categoría definida.

Se logran calcular factores de emisión y proporciones de carbono negro para cada una de las categorías vehiculares definidas, observándose intervalos de confianza del 95% más amplios para las emisiones de neumático y carretera especialmente. La falta de datos para estas dos fuentes abrasivas y las diferencias entre los factores de emisión obtenidos para las mismas categorías vehiculares justifica el uso de las medianas de los datos para realizar una estimación más acertada.

Para Chile, las curvas de porcentaje de participación de las emisiones abrasivas indican tendencias de crecimiento muy bruscas, observándose que en los próximos años las emisiones de PM_{2,5} por abrasión superarán a las emisiones por tubo de escape, y en proyecciones a largo plazo, el carbono negro por abrasión tomará mayor importancia.

Mientras que, en el caso de Colombia, las curvas de participación son menos pronunciadas, pero igualmente incrementan de manera considerable cada año.

Comparando ambos países, Colombia presenta una mayor población, lo cual se relaciona directamente con un mayor número de vehículos en circulación, incrementando la densidad vehicular, además sugiriendo mayores probabilidades de congestiones de tráfico, situaciones en las que los vehículos circulan a bajas velocidades. En estos contextos, el consumo de combustible, y por ende las emisiones por escape se mantiene considerable, mientras que el desgaste abrasivo se reduce significativamente, explicando las diferencias que tiene Colombia entre sus emisiones por escape y desgaste abrasivo.

4.3. Recomendaciones

Se recomienda relacionar condiciones de manejo y frenado en la formación de las emisiones de tantos frenos, neumáticos y carreteras, incorporando factores como velocidad, aceleración, tiempo de frenado y peso vehicular en la cantidad de material particulado formado.

En cuanto al cálculo de los factores de emisión, se recomienda realizar una categorización aún más profunda de las categorías vehiculares, distinguiendo entre tamaño de vehículo de carga, y las versiones eléctricas de cada categoría vehicular. Para el caso de los vehículos de carga, se incluyeron los buses, ya que sus factores de emisión son similares, pero también por la información escasa para ambas categorías. Por eso, se sugiere hacer una separación de sus factores de emisión mediante más fuentes de información a futuro, con fin de obtener una estimación más precisa.

Para el desarrollo de este trabajo, solo se considera la formación y emisión instantánea de los contaminantes relacionados al PM_{2,5}, pero no se considera la resuspensión de polvo, que corresponde al caso en el que, gracias al movimiento vehicular, el polvo ya depositado en tanto las superficies de la carretera, los frenos y los neumáticos se impulsan y liberan a la atmósfera, lo cual entregarían resultados con valores mayores a los obtenidos en esta estimación. Por ello, se recomienda considerar factores de emisión de resuspensión para una estimación futura y calcular la proporción de emisiones totales que ocupa para destacar la importancia de su cálculo.

Para el caso de Colombia, los vehículos eléctricos pasajeros están considerados dentro de la categoría general de vehículos pasajeros, y no se realiza una estimación de la proporción de vehículos eléctricos dentro de ese total ya que la participación de dicha categoría vehicular sigue siendo muy baja. Debido a esto, se recomienda realizar una proyección de las emisiones, observando distintos factores, como el tema de la participación de los vehículos eléctricos dentro de la flota vehicular y la implementación de materiales que reducen el desgaste, como el caso de las pastillas de freno cerámicas y de material NAO, o nuevas tecnologías de neumático y carretera, y ver cómo la incorporación de estas medidas afecta el comportamiento de las emisiones totales en los próximos años.

Se sugiere hacer una desagregación espacial de las emisiones en ambos países, con el fin de identificar zonas con mayores concentraciones de contaminantes. Además, se podrían relacionar las concentraciones obtenidas con estándares de calidad de aire y riesgos de desarrollo de enfermedades respiratorias o cardiovasculares.

Bibliografía

- [1] B. Mahapatra, M. Walia, W. R. Avis, y N. Saggurti, “Effect of exposure to PM 10 on child health: Evidence based on a large-scale survey from 184 cities in India”, *BMJ Glob Health*, vol. 5, no 8, ago. 2020, doi: 10.1136/bmjgh-2020-002597.
- [2] Heinz. Heisler, *Advanced vehicle technology*. Butterworth Heinemann, 2002.
- [3] E. Bayas, “Coupled Field analysis of Disc brake rotor”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320627834>
- [4] E. S. Mathew, “Disc vs Drum Brakes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.autozone.com/diy/brakes/disc->
- [5] A. Rashid, “Overview of disc brakes and related phenomena - A review”, 1 de noviembre de 2014, *Inderscience Publishers*. doi: 10.1504/IJNVN.2014.065634.
- [6] “Frenos de Tambor → Hangar 1”. Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://nuevo2.hangar1.com.mx/frenos-de-tambor/?v=267d696eab9e>
- [7] “Los Frenos a Tambor | Fierros Clasicos”. Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fierrosclasicos.com/los-frenos-a-tambor/>
- [8] T. Grigoratos y G. Martini, “Brake wear particle emissions: a review”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no 4, pp. 2491–2504, feb. 2015, doi: 10.1007/s11356-014-3696-8.
- [9] P. Wåhlin, R. Berkowicz, y F. Palmgren, “Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen”, *Atmos Environ*, vol. 40, no 12, pp. 2151–2159, abr. 2006, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.11.049.
- [10] “THE MANY FUNCTIONS OF TYRES... | Australian Road Safety Foundation”. Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://arsf.com.au/the-many-functions-of-tyres/>
- [11] M. Zhang, H. J. Unrau, M. Gießler, y F. Gauterin, “Tire tread wear characteristics: Insights from indoor experiments and analytical modeling”, *Tribol Int*, vol. 210, oct. 2025, doi: 10.1016/j.triboint.2025.110752.
- [12] A. G. Veith, “Accelerated Tire Wear under Controlled Conditions. II. Some Factors that Influence Tire Wear”, *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 46, no 4, pp. 821–842, sep. 1973, doi: 10.5254/1.3547413.
- [13] M. S. Senin, S. Shahidan, A. S. Leman, y N. I. R. R. Hannan, “Analysis of Physical Properties and Mineralogical of Pyrolysis Tires Rubber Ash Compared Natural Sand in Concrete material”, en *IOP Conference Series: Materials*

Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, dic. 2016. doi: 10.1088/1757-899X/160/1/012053.

- [14] “¿Qué componentes tiene el neumático? - blog Neomatique”. Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.neomatique.es/blog/que-componentes-tiene-el-neumatico>
- [15] A. Sherman, L. E. Hämmerle, E. Ben Mordechay, B. Chefetz, T. Hüffer, y T. Hofmann, “Uptake of tire-derived compounds in leafy vegetables and implications for human dietary exposure”, *Front Environ Sci*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/FENVS.2024.1384506.
- [16] P. Weng, Z. Tang, y B. Guo, “Solving ‘magic triangle’ of tread rubber composites with phosphonium-modified petroleum resin”, *Polymer (Guildf)*, vol. 190, mar. 2020, doi: 10.1016/j.polymer.2020.122244.
- [17] J. Meech y J. Parreira, “Predicting wear and temperature of autonomous haulage truck tires”, en *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, IFAC Secretariat, 2013, pp. 142–147. doi: 10.3182/20130825-4-US-2038.00078.
- [18] C. Becker y S. Els, “Agricultural tyre stiffness change as a function of tyre wear”, *J Terramech*, vol. 102, pp. 1–15, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jterra.2022.04.001.
- [19] “Tipos de desgaste de los neumáticos y cuáles son las causas”. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.motor.es/noticias/tipos-desgaste-neumaticos-causas-202287995.html>
- [20] S. Bhandari, X. Luo, y F. Wang, “Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance”, *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, no 1, pp. 258–272, mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijtst.2022.02.004.
- [21] “¿Cómo se hace el asfalto?” Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.vise.com.mx/como-se-hace-el-asfalto>
- [22] “(13) The Role of Bitumen in Road Construction | LinkedIn”. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/role-bitumen-road-construction-sara-khademian-sp8yf/>
- [23] X. Zhang, H. Wang, M. Chi, Z. Xu, y G. Xu, “Experimental investigation on wear behavior of asphalt pavement based on three-dimensional surface texture scan technology”, *Constr Build Mater*, vol. 412, ene. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134851.

- [24] E. E. RODRÍGUEZ, “INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-2”, BOGOTÁ, 2011.
- [25] M. Etxandi-Santolaya, L. Canals Casals, y C. Corchero, “Estimation of electric vehicle battery capacity requirements based on synthetic cycles”, *Transp Res D Transp Environ*, vol. 114, ene. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2022.103545.
- [26] D. C. S. Beddows y R. M. Harrison, “PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles”, *Atmos Environ*, vol. 244, ene. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117886.
- [27] V. R. J. H. Timmers y P. A. J. Achten, “Non-exhaust PM emissions from electric vehicles”, 1 de junio de 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.017.
- [28] M. Islameka, B. A. Budiman, F. B. Juangsa, y M. Aziz, “Energy management systems for battery electric vehicles”, en *Emerging Trends in Energy Storage Systems and Industrial Applications*, Elsevier, 2022, pp. 113–150. doi: 10.1016/B978-0-323-90521-3.00006-5.
- [29] T. Karageorgiou y A. 3 B. Vi, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory”.
- [30] Benjamin Encalada Caro, “CÁLCULO DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO PRODUCIDAS POR PROCESOS ABRASIVOS DE LOS VEHÍCULOS TERRESTRES EN CHILE”, 2023.
- [31] E. S. Lee *et al.*, “Supporting Information Tracer-Gas-Integrated Measurements of Brake-Wear Particulate Matter Emissions from Heavy-Duty Vehicles”.
- [32] V. V. Gavimath y S. Ravuri, “Developing Real-World Drive Cycles for Heavy-Duty Freight Vehicles using On-Board Diagnostics Data”, en *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., 2025, pp. 158–174. doi: 10.1016/j.trpro.2024.12.035.
- [33] E. S. Lee *et al.*, “Tracer-Gas-Integrated Measurements of Brake-Wear Particulate Matter Emissions from Heavy-Duty Vehicles”, *Environ Sci Technol*, vol. 57, no 42, pp. 15968–15978, oct. 2023, doi: 10.1021/acs.est.3c03673.
- [34] J. Yin *et al.*, “Laboratory measurement and machine learning-based analysis of driving factors for brake wear particle emissions from light-duty electric vehicles and heavy-duty vehicles”, *J Hazard Mater*, vol. 488, may 2025, doi: 10.1016/j.jhazmat.2025.137433.
- [35] “¿Qué es una mangueta de dirección y por qué es importante? | Subaru Parts Plus”. Accedido: 17 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.subarupartsplus.com/blog/steering-knuckle-explained?srsId=AfmBOorpQU2MuvKrEjsW66O5HtXg3A69ZMpT6KburLQIp2bCG-dBZCJf>

- [36] L. Storch *et al.*, “Comprehensive Analysis of Current Primary Measures to Mitigate Brake Wear Particle Emissions from Light-Duty Vehicles”, *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no 4, abr. 2023, doi: 10.3390/atmos14040712.
- [37] T. Grigoratos *et al.*, “Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions—Part I: Particulate Matter Mass Emissions”, *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no 3, mar. 2023, doi: 10.3390/atmos14030498.
- [38] M. J. Page *et al.*, “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews”, 29 de marzo de 2021, *BMJ Publishing Group*. doi: 10.1136/bmj.n71.
- [39] B. Giechaskiel, T. Grigoratos, P. Dilara, T. Karageorgiou, L. Ntziachristos, y Z. Samaras, “Light-Duty Vehicle Brake Emission Factors”, 1 de enero de 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/atmos15010097.
- [40] M. Osses *et al.*, “High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990-2020”, *Earth Syst Sci Data*, vol. 14, no 3, pp. 1359–1376, mar. 2022, doi: 10.5194/essd-14-1359-2022.
- [41] N. Y. Rojas *et al.*, “Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation”, *Transp Res D Transp Environ*, vol. 121, ago. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103780.
- [42] B. D. Garg, S. H. Cadle, P. A. Mulawa, P. J. Groblicki, C. Laroo, y G. A. Parr, “Brake wear particulate matter emissions”, *Environ Sci Technol*, vol. 34, no 21, pp. 4463–4469, nov. 2000, doi: 10.1021/es001108h.
- [43] “TNO Web - CEPMEIP Database - Emission Factors - Results”. Accedido: 18 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.air.sk/tno/cepmeip/em_factors_results.php?
- [44] S. H. Kim *et al.*, “The Impact of Composition in Non-steel and Low-Steel Type Friction Materials on Airborne Brake Wear Particulate Emission”, *Tribol Lett*, vol. 68, no 4, dic. 2020, doi: 10.1007/s11249-020-01361-2.
- [45] U. Epa, O. of Transportation, A. Quality, y S. Division, “Brake and Tire Wear Emissions from Onroad Vehicles in MOVES3 (EPA-420-R-20-014, November 2020)”.
- [46] C. Agudelo, R. T. Vedula, S. Collier, y A. Stanard, “Brake particulate matter emissions measurements for six light-duty vehicles using inertia dynamometer

- testing”, en *SAE Technical Papers*, SAE International, oct. 2020. doi: 10.4271/2020-01-1637.
- [47] D. Hesse, C. Hamatschek, T. Feißel, H. Sachse, K. Augsburg, y S. Gramstat, “Investigations on the Deposition Behaviour of Brake Wear Particles on the Wheel Surface”, en *SAE Technical Papers*, SAE International, oct. 2021. doi: 10.4271/2021-01-1301.
 - [48] Y. Tonegawa y S. Sasaki, “Development of Tire-Wear Particle Emission Measurements for Passenger Vehicles”, doi: 10.1007/s40825-020-00181-z/Published.
 - [49] M. P. Huber, P. Fischer, A. Mamakos, G. Steiner, y A. Klug, “Measuring Brake Wear Particles with a Real-Driving Emissions Sampling System on a Brake Dynamometer”, en *SAE Technical Papers*, SAE International, sep. 2022. doi: 10.4271/2022-01-1180.
 - [50] S. H. Woo, H. Jang, S. B. Lee, y S. Lee, “Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis”, *Science of the Total Environment*, vol. 842, oct. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156961.
 - [51] M. P. Huber *et al.*, “Characterizing a Real-Driving Brake Emissions Sampling System on a Laboratory Test Bed”, *SAE Int J Adv Curr Pract Mobil*, vol. 6, no 5, pp. 2615–2627, nov. 2023, doi: 10.4271/2023-01-1875.
 - [52] J. Tivey *et al.*, “Meta-Analysis as Early Evidence on the Particulate Emissions Impact of EURO VI on Battery Electric Bus Fleet Transitions”, *Sustainability*, vol. 15, no 2, p. 1522, ene. 2023, doi: 10.3390/su15021522.
 - [53] J. Andersson *et al.*, “A Practical Approach for On-Road Measurements of Brake Wear Particles from a Light-Duty Vehicle”, *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no 2, feb. 2024, doi: 10.3390/atmos15020224.
 - [54] H. Hagino, “Brake Wear and Airborne Particle Mass Emissions from Passenger Car Brakes in Dynamometer Experiments Based on the Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure Brake Cycle”, *Lubricants*, vol. 12, no 6, jun. 2024, doi: 10.3390/lubricants12060206.
 - [55] Q. Zhang *et al.*, “Direct measurement of brake and tire wear particles based on real-world driving conditions”, *Science of the Total Environment*, vol. 906, ene. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167764.
 - [56] J. Zhang *et al.*, “Vehicular non-exhaust particulate emissions in Chinese megacities: Source profiles, real-world emission factors, and inventories”, *Environmental Pollution*, vol. 266, nov. 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115268.

- [57] S. H. Woo, H. Jang, M. Y. Na, H. J. Chang, y S. Lee, “Characterization of brake particles emitted from non-asbestos organic and low-metallic brake pads under normal and harsh braking conditions”, *Atmos Environ*, vol. 278, jun. 2022, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119089.
- [58] T. Sarica *et al.*, “Sensitivity of pollutant concentrations in urban streets to asphalt and traffic-related emissions”, *Environmental Pollution*, vol. 332, sep. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121955.

Anexo 1

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import re
import numpy as np

dfs = pd.read_excel(r'd:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\Codigos Python\Non-exhaust-emission-factors-
V2.xlsx', sheet_name="Sheet2")
columnas_pm25 = ['PM2_5_road_surface', 'PM2_5_tyre', 'PM2_5_brake']
columns_to_keep = ['Source', 'Vehicle_category'] + columnas_pm25

# LIMPIEZA Y CATEGORIZACIÓN
df_melted = dfs[columns_to_keep].melt(
    id_vars=['Source', 'Vehicle_category'],
    value_vars=columnas_pm25,
    var_name='Emission_Source',
    value_name='PM2_5_Value'
)

df_melted['Emission_Source'] = df_melted['Emission_Source'].str.replace('PM2_5_',
    '').str.replace('_', ' ').str.title()
df_melted['Vehicle_category'] = df_melted['Vehicle_category'].str.replace('ART',
    'HDV').str.replace('BUS', 'HDV')
df_melted = df_melted.dropna()

def extract_year(source):
    match = re.search(r'\((\d{4})\)', source)
    return int(match.group(1)) if match else 0

df_melted['Year'] = df_melted['Source'].apply(extract_year)
df_melted['Marker'] = 'circle'
df_melted.loc[df_melted['Source'].str.contains('EMEP.*2024', na=False), 'Marker'] = 'triangle'

df_melted = df_melted.groupby(['Source', 'Vehicle_category', 'Emission_Source', 'Year',
    'Marker']).agg({
    'PM2_5_Value': 'mean'
}).reset_index()

# CONFIGURACIÓN GRÁFICOS
fuentes_unicas = df_melted[['Source',
    'Year']].drop_duplicates().sort_values('Year')['Source'].tolist()
n_fuentes = len(fuentes_unicas)
colores = plt.cm.tab20(np.linspace(0, 1, n_fuentes))
fuente_colores = dict(zip(fuentes_unicas, colores))

categorias_vehiculares = sorted(df_melted['Vehicle_category'].unique())
emission_sources = ['Road Surface', 'Tyre', 'Brake']

medianas_df = pd.DataFrame(index=categorias_vehiculares, columns=emission_sources)
ic_lower_df = pd.DataFrame(index=categorias_vehiculares, columns=emission_sources)
ic_upper_df = pd.DataFrame(index=categorias_vehiculares, columns=emission_sources)

# CREACIÓN DE FIGURAS
figuras = []
for i, source in enumerate(emission_sources):
    fig = plt.figure(i+1, figsize=(10, 6))
    ax = fig.add_subplot(111)
    fig.suptitle('Distribución de Factores de Emisión PM2,5 por Categoría Vehicular', fontsize=12,
```

```

fontweight='bold')

source_data = df_melted[df_melted['Emission_Source'] == source]
if len(source_data) == 0:
    print(f" NO HAY DATOS PARA {source}")
    continue

sns.boxplot(data=source_data, x='Vehicle_category', y='PM2_5_Value', ax=ax, color='lightgray',
showfliers=False, zorder=1, width=0.5)
categorias_tier2 = source_data['Vehicle_category'].unique()
ax.set_xlim(-0.5, len(categorias_tier2) - 0.65)

# PUNTOS Y LEYENDA
legend_elements = []
legend_elements.append(plt.Line2D([0], [0], color='blue', linestyle=':', linewidth=1, label='IC
95%'))

for src in fuentes_unicas:
    src_data = source_data[source_data['Source'] == src]
    if len(src_data) > 0:
        grouped_data = src_data.groupby('Vehicle_category')['PM2_5_Value'].mean().reset_index()
        x_positions, y_values = [], []

        for cat in categorias_tier2:
            cat_data = grouped_data[grouped_data['Vehicle_category'] == cat]
            if len(cat_data) > 0:
                x_positions.append(np.where(categorias_tier2 == cat)[0][0])
                y_values.append(cat_data['PM2_5_Value'].iloc[0])

        if len(x_positions) > 0:
            marker_style = '^' if 'triangle' in src_data['Marker'].iloc[0] else 'o'
            marker_color = 'red' if marker_style == '^' else fuente_colores[src]
            marker_size = 50 if marker_style == '^' else 40

            legend_elements.append(plt.Line2D([0], [0], marker=marker_style, color='w',
markerfacecolor=marker_color, markersize=6, label=src))
            ax.scatter(x=x_positions, y=y_values, color=marker_color, marker=marker_style,
s=marker_size, edgecolor='black', linewidth=0.5, zorder=10)

# INTERVALOS DE CONFIANZA
for j, cat in enumerate(categorias_tier2):
    cat_data = source_data[source_data['Vehicle_category'] == cat]['PM2_5_Value']
    if len(cat_data) > 1:
        n_bootstrap = 1000
        bootstrap_medians = [np.median(np.random.choice(cat_data, len(cat_data), replace=True))
for _ in range(n_bootstrap)]
        ci_lower, ci_upper = np.percentile(bootstrap_medians, [2.5, 97.5])
        mediana = cat_data.median()

        medianas_df.loc[cat, source] = mediana
        ic_lower_df.loc[cat, source] = ci_lower
        ic_upper_df.loc[cat, source] = ci_upper

        ax.hlines(y=[ci_lower, ci_upper], xmin=j-0.2, xmax=j+0.2, colors='blue', styles=':',
alpha=0.6, linewidth=1, zorder=2)
        ax.vlines(x=[j-0.2, j+0.2], ymin=ci_lower, ymax=ci_upper, colors='blue', styles=':',
alpha=0.4, linewidth=0.5, zorder=2)
    else:
        mediana = cat_data.iloc[0] if len(cat_data) == 1 else np.nan
        medianas_df.loc[cat, source] = mediana

```

```

        ic_lower_df.loc[cat, source] = np.nan
        ic_upper_df.loc[cat, source] = np.nan

# PERSONALIZACIÓN FINAL
ax.set_title(f'PM2,5 - {source}', fontweight='bold', fontsize=11)
ax.set_xlabel('Categoría Vehicular', fontweight='bold', fontsize=10)
ax.set_ylabel('EF PM2,5 [g/km]', fontweight='bold', fontsize=10)
ax.tick_params(axis='x', rotation=45)
ax.grid(axis='y', alpha=0.3, zorder=0)

ax.legend(handles=legend_elements, title='Fuentes (ordenadas por año)', loc='center left',
bbox_to_anchor=(1.02, 0.5), fontsize=8, title_fontsize=9)
plt.tight_layout()
plt.subplots_adjust(right=0.75)
figuras.append(fig)

plt.show()

# EXPORTACIÓN RESULTADOS
resultados_combinados = pd.DataFrame(index=categorias_vehiculares)
for source in emission_sources:
    source_snake = source.lower().replace(' ', '_')
    resultados_combinados[source_snake] = medianas_df[source]
    resultados_combinados[f'{source_snake}_inferior_IC95'] = ic_lower_df[source]
    resultados_combinados[f'{source_snake}_superior_IC95'] = ic_upper_df[source]

column_order = []
for source in ['brake', 'tyre', 'road_surface']:
    column_order.extend([source, f'{source}_inferior_IC95', f'{source}_superior_IC95'])

resultados_combinados = resultados_combinados[column_order]
print("=== RESULTADOS COMBINADOS ===")
print(resultados_combinados)

try:
    with pd.ExcelWriter('resultados_pm25_descriptivos.xlsx') as writer:
        resultados_combinados.to_excel(writer, sheet_name='Resultados', float_format='%.6f')
        print("Resultados guardados en 'resultados_pm25_descriptivos.xlsx'")
except Exception as e:
    print(f"Error al guardar: {e}")

print(f"Fuentes: {len(fuentes_unicas)}")
print(f"Categorías: {list(categorias_vehiculares)}")

```

Anexo 2

```
import pandas as pd
import re
import numpy as np

av = pd.read_excel(r'D:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\VKT Y EMISIONES\Emissiones CHILE KABIR\DATOS
INICIALES\VKT_proyectado.xlsx', sheet_name="PROYECTADO")
ef_pm = pd.read_excel(r'D:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\VKT Y EMISIONES\Emissiones CHILE
KABIR\DATOS INICIALES\FE.xlsx', sheet_name="NEE PM2,5")
ef_bc = pd.read_excel(r'D:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\VKT Y EMISIONES\Emissiones CHILE
KABIR\DATOS INICIALES\FE.xlsx', sheet_name="NEE BC")

def recategorizar(fila):
    if fila['Categoria'] in ['VLP', 'TAX'] and fila['Norma'] == 'Electrico':
        return 'PC-EV'
    elif fila['Categoria'] in ['VLP', 'TAX']:
        return 'PC'
    elif fila['Categoria'] == 'VLC':
        return 'LCV'
    elif any(x in fila['Categoria'] for x in ['CAM', 'BUS']):
        return 'HDV'
    else:
        return fila['Categoria']

av['Categoria'] = av.apply(recategorizar, axis=1)

cols_2013 = [col for col in av.columns if str(col).isdigit() and int(col) >= 2013]
ef_2013 = [col for col in ef_pm.columns if str(col).isdigit() and int(col) >= 2013]

columnas_no_años = ['Region', 'Categoria', 'Unidad']
columnas_a_mantener = columnas_no_años + cols_2013
columnas_no_años_ef = ['Region', 'Categoria', 'Fuente', 'Unidad']
columnas_a_mantener_ef = columnas_no_años_ef + cols_2013

av_agrupado = av.groupby(['Region', 'Categoria', 'Unidad'])[cols_2013].sum().reset_index()
av_agrupado = av_agrupado[columnas_a_mantener]

ef_pm = ef_pm[columnas_a_mantener_ef]
ef_bc = ef_bc[columnas_a_mantener_ef]

for i, fila_av in av_agrupado.iterrows():
    region_av = fila_av['Region']
    categoria_av = fila_av['Categoria']

    for j, fila_ef in ef_pm.iterrows():
        if region_av == fila_ef['Region'] and categoria_av == fila_ef['Categoria']:
            for year in cols_2013:
                vkt = fila_av[year]
                ef = fila_ef[year]
                nuevo = vkt * ef
                ef_pm.at[j, year] = nuevo

    for j, fila_ef in ef_bc.iterrows():
        if region_av == fila_ef['Region'] and categoria_av == fila_ef['Categoria']:
            for year in cols_2013:
                vkt = fila_av[year]
                ef = fila_ef[year]
                nuevo = vkt * ef
                ef_bc.at[j, year] = nuevo

ef_pm['Unidad'] = "[g/año]"
ef_pm_region = ef_pm.groupby(['Region', 'Unidad'])[cols_2013].sum().reset_index()
```

```

ef_pm_fuente = ef_pm.groupby(['Fuente', 'Unidad'])[cols_2013].sum().reset_index()

ef_bc['Unidad'] = "[g/año]"
ef_bc_region = ef_bc.groupby(['Region', 'Unidad'])[cols_2013].sum().reset_index()
ef_bc_fuente = ef_bc.groupby(['Fuente', 'Unidad'])[cols_2013].sum().reset_index()

with pd.ExcelWriter('Estimacion_PM25_proyectado_kabir.xlsx') as writer:
    av_agrupado.to_excel(writer, sheet_name='VKT', index=False)
    ef_pm.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones PM25', index=False)
    ef_pm_region.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones totales regional', index=False)
    ef_pm_fuente.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones totales fuente', index=False)

with pd.ExcelWriter('Estimacion_BC_proyectado_kabir.xlsx') as writer:
    av_agrupado.to_excel(writer, sheet_name='VKT', index=False)
    ef_bc.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones BC', index=False)
    ef_bc_region.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones totales regional', index=False)
    ef_bc_fuente.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones totales fuente', index=False)

```

Anexo 3

```
import pandas as pd

av = pd.read_excel(r"D:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\VKT Y EMISIONES\pronostico_tasa_ajustada
BUENO.xlsx", sheet_name="Hoja1")
ef_pm = pd.read_excel(r"D:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\VKT Y EMISIONES\Emisiones COLOMBIA
KABIR\DATOS INICIALES\EF.xlsx", sheet_name="PM2,5")
ef_bc = pd.read_excel(r"D:\USM\6 Año\12vo semestre\mec399\VKT Y EMISIONES\Emisiones COLOMBIA
KABIR\DATOS INICIALES\EF.xlsx", sheet_name="BC")

# Convertir columnas de años a enteros
def convertir_columnas_numericas(df):
    nuevas_columnas = []
    for col in df.columns:
        try:
            nuevas_columnas.append(int(col))
        except (ValueError, TypeError):
            nuevas_columnas.append(col)
    df.columns = nuevas_columnas
    return df

ef_pm = convertir_columnas_numericas(ef_pm)
ef_bc = convertir_columnas_numericas(ef_bc)
av = convertir_columnas_numericas(av)

# Recategorizar Vehicle Class
def recategorizar(fila):
    if fila['Vehicle Class'] in ['Buses', 'Heavy Duty Vehicles']:
        return 'HDV'
    elif fila['Vehicle Class'] == 'L-Category':
        return 'MOT'
    elif fila['Vehicle Class'] == 'Passenger cars':
        return 'PC'
    elif fila['Vehicle Class'] == 'Light Commercial Vehicles':
        return 'LCV'
    else:
        return fila['Vehicle Class']

av['Vehicle Class'] = av.apply(recategorizar, axis=1)

if 'Numero' in av.columns:
    del av['Numero']

if 'Departamento' in av.columns:
    posicion_deseada = av.columns.get_loc("Departamento") + 1
    av.insert(posicion_deseada, 'Unidad', '[km]')

cols_1990 = [col for col in av.columns if isinstance(col, int) and col >= 1990]

# Agrupar VKT
pc_df = av[av['Vehicle Class'] == 'PC'].copy()
no_pc_df = av[av['Vehicle Class'] != 'PC'].copy()

# Agrupar PC manteniendo Vehicle Class
if len(pc_df) > 0:
    # Agrupar por AMBAS columnas
    pc_agrupado = pc_df.groupby(['Segment', 'Vehicle Class'], as_index=False).agg({
        **{col: 'sum' for col in cols_1990} # Solo sumar columnas de años
    })
```

```

# Combinar
av_final = pd.concat([pc_agrupado, no_pc_df], ignore_index=True)
hdv_rows = av_final[av_final['Vehicle Class'] == 'HDV']
lcv_rows = av_final[av_final['Vehicle Class'] == 'LCV']
mot_rows = av_final[av_final['Vehicle Class'] == 'MOT']

# Calcular las sumas por año para cada categoría por separado
sum_hdv = hdv_rows[cols_1990].sum()
sum_lcv = lcv_rows[cols_1990].sum()
sum_mot = mot_rows[cols_1990].sum()

# Crear nuevas filas de total para cada categoría
# Para HDV
total_hdv_row = pd.DataFrame(['Total HDV', 'HDV'] + [sum_hdv[year] for year in cols_1990] + ['',
'', ''],
                             columns=av_final.columns)

# Para LCV
total_lcv_row = pd.DataFrame(['Total LCV', 'LCV'] + [sum_lcv[year] for year in cols_1990] + ['',
'', ''],
                             columns=av_final.columns)

# Para MOT
total_mot_row = pd.DataFrame(['Total MOT', 'MOT'] + [sum_mot[year] for year in cols_1990] + ['',
'', ''],
                             columns=av_final.columns)

# Concatenar totales de cada categoría
av_agrupado = pd.concat([pc_agrupado, total_hdv_row, total_lcv_row, total_mot_row],
ignore_index=True)

ef_pm_calc = ef_pm.copy()
ef_bc_calc = ef_bc.copy()

for j, fila_pm in ef_pm_calc.iterrows():
    categoria_pm = fila_pm['Categoría']
    tamano_pm = fila_pm['Tamaño']

    for i, fila_av in av_agrupado.iterrows():
        categoria = fila_av['Vehicle Class']
        tamano = fila_av['Segment']
        if categoria_pm == categoria == 'PC':
            if tamano_pm == tamano:
                for year in cols_1990:
                    vkt = fila_av[year]
                    ef = fila_pm[year]
                    nuevo = (vkt * ef)
                    ef_pm.at[j, year] = nuevo
            else:
                continue

        elif categoria_pm == categoria != 'PC':
            for year in cols_1990:
                vkt = fila_av[year]
                ef = fila_pm[year]
                nuevo = (vkt * ef)
                ef_pm.at[j, year] = nuevo

for j, fila_bc in ef_bc_calc.iterrows():
    categoria_bc = fila_bc['Categoría']
    tamano_bc = fila_bc['Tamaño']

    for i, fila_av in av_agrupado.iterrows():

```

```

        categoria = fila_av['Vehicle Class']
        tamano = fila_av['Segment']
        if categoria_bc == categoria == 'PC':
            if tamano_bc == tamano:
                for year in cols_1990:
                    vkt = fila_av[year]
                    ef = fila_bc[year]
                    nuevo = (vkt * ef)
                    ef_bc.at[j, year] = nuevo
            else:
                continue

        elif categoria_bc == categoria != 'PC':
            for year in cols_1990:
                vkt = fila_av[year]
                ef = fila_bc[year]
                nuevo = (vkt * ef)
                ef_bc.at[j, year] = nuevo

# Agregar columna Unidad a resultados
if 'Categoria' in ef_pm:
    posicion = ef_pm.columns.get_loc("Categoria") + 1
    ef_pm.insert(posicion, 'Unidad', '[g/año]')
    ef_bc.insert(posicion, 'Unidad', '[g/año]')

# Crear resúmenes por fuente
if 'Fuente' in ef_pm.columns:
    ef_pm_fuente = ef_pm.groupby(['Fuente', 'Unidad'])[cols_1990].sum().reset_index()
    ef_bc_fuente = ef_bc.groupby(['Fuente', 'Unidad'])[cols_1990].sum().reset_index()

with pd.ExcelWriter('Estimacion_PM25_BC_kabir_corregido.xlsx') as writer:
    av_agrupado.to_excel(writer, sheet_name='VKT', index=False)
    ef_pm.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones PM2.5', index=False)
    ef_pm_fuente.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones totales fuente PM2.5', index=False)
    ef_bc.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones BC', index=False)
    ef_bc_fuente.to_excel(writer, sheet_name='Emisiones totales fuente BC', index=False)

```