



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Inventario de emisiones de fuentes móviles bajo metodología Bottom - Up para Bogotá, Colombia y análisis de escenarios de oferta para su reducción

David Felipe Jaime Vásquez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2022

Inventario de emisiones de fuentes móviles bajo metodología Bottom - Up para Bogotá, Colombia y análisis de escenarios de oferta para su reducción

David Felipe Jaime Vásquez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Transporte

Director (a):

Sonia Cecilia Mangones Matos. M. Eng. M.Sc. Ph.D.

Línea de Investigación:

Planeación de Transporte

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en logística para el transporte sostenible y la seguridad -
TRANSLOGYT

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2022

A mi madre, Aida Vásquez, cuya ostensible fuerza me trajo hasta aquí. Por no darse por vencida, especialmente conmigo.

A mi padre, Mario Jaime, por su apoyo absoluto en los intrínquilis que me ha puesto la vida.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



David Felipe Jaime Vásquez

Fecha 17/03/2022

Agradecimientos

Gratitud infinita con Dios, mi familia, amigos y la Universidad Nacional de Colombia que hicieron posible este trabajo de grado.

A mis padres, *Mario* y *Aida*, por su amor y soporte en cada aspecto durante este tiempo de crisis donde se desarrolló este trabajo de investigación.

A *Miguel Jaime*, mi hermano, por ser ejemplo de fortaleza, seguridad y resiliencia en mi vida.

A *Sonia Mangones*, por su orientación desde la dirección de esta investigación, por su tiempo y conocimiento.

A *Juan Camilo Aros*, por enseñarme apaciguadamente que no hay nada imposible de resolver. Por brindarme sus amplios conocimientos en Sistemas de Información Geográfica (SIG), por su acuciante apoyo, amor y paciencia.

A *Andrés Restrepo*, por su valiosa disposición y guía fundamental en la estructuración del código en lenguaje de programación Python necesario para el establecimiento del inventario y, sobre todo, por su amistad incondicional.

A *Miguel Ángel Ospina*, por sus tutorías y aportes sobre el Modelo Privado de Transporte de Bogotá D.C.

A *María Alejandra García*, por sus palabras de aliento durante el desarrollo del posgrado.

Resumen

Inventario de emisiones de fuentes móviles bajo metodología Bottom - Up para Bogotá, Colombia y análisis de escenarios de oferta para su reducción

La contaminación del aire en Bogotá está altamente relacionada con los vehículos que son responsables del mayor porcentaje de las emisiones de contaminantes. Los inventarios de emisión son una herramienta para la identificación de fuentes potenciales de contaminación y la formulación de programas de gestión de calidad del aire. Esta investigación contempla la actualización para Bogotá D.C. del inventario de emisiones por fuentes móviles en ruta para CO , NO_x , $PM_{2.5}$, SO_2 , COV y CO_2 . Se utiliza un enfoque Bottom-Up a partir del factor actividad obtenido del modelo de planificación de transporte de la ciudad para la hora pico en 18,600 enlaces de la malla vial. Se utilizan 1,770 factores de emisión de COPERT V adaptados a las condiciones típicas de operación de tráfico y la distribución tecnológica del parque automotor.

Se reporta que los vehículos livianos contribuyen con más del 70 % de las emisiones de CO y SO_2 , y más del 50% de la emisión de COV y CO_2 . Los buses del SITP y del transporte intermunicipal, y los camiones contribuyen con un 26% y 28% respectivamente, y además producen las mayores emisiones de $PM_{2.5}$. Adicionalmente, se compara el comportamiento de las emisiones por las obras de infraestructura de gran impacto de Bogotá, frente al panorama de oferta constante, obteniendo una reducción comparativa de emisión entre 2% y 4% para los contaminantes contemplados. Finalmente, se reporta que los programas de restricción a la circulación para motocicletas y vehículos privados representan en conjunto los escenarios con mayor potencial de disminución de contaminación. Poner en marcha únicamente programas de movilidad eléctrica y de bajas emisiones no repercute en disminuciones mayores al 11% en el corto plazo.

Palabras clave: Contaminante, inventario de emisiones, factor de emisión, factor de actividad, modelo de transporte, fuentes móviles en ruta, escenario.

Abstract

Mobile source emissions inventory using a Bottom - Up methodology for Bogotá, Colombia and analysis of supply scenarios for their reduction

Traffic-related emissions in Bogotá are responsible for the highest percentage of air pollution problems. Emission inventories are an essential tool for identifying potential sources of pollution and applying for air quality management programs. Our investigation updates the on-road vehicle emissions inventory for Bogotá using a Bottom-Up approach based on the activity factor obtained from the city's transport planning model for rush hour in 18,600 links of the road network. Additionally, we used 1,770 COPERT V emission factors, adapted to typical traffic operating conditions and technological distribution of the vehicle fleet.

We found that light vehicles contribute more than 70% of CO and SO_2 emissions and more than 50% of VOC and SO_2 emissions. SITP and inter-municipal buses, and trucks contribute with 26% and 28%, respectively, and produce the highest emissions of $PM_{2.5}$. Additionally, we compare the expected emissions for the construction period of high-impact infrastructure work against the panorama of constant transport supply, obtaining a relative emission reduction of between 2% and 4% for the pollutants analyzed. Finally, we report that the mobility restriction programs for motorcycles and private vehicles have a great potential to reduce pollution emissions. The adoption of electric low-emission vehicles will not result in reductions greater than 11% in the short term.

Keywords: Pollutant, emissions inventory, emission factor, activity factor, transport model, on road mobile sources, scenario.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Abstract.....	X
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas.....	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
1. Introducción.....	21
1.1 Marco Teórico	22
1.1.1 Fuentes móviles de contaminación.....	22
1.1.2 Inventario de emisión.	23
1.1.3 Factores de emisión.	25
1.1.4 Modelos de emisión.....	26
1.1.5 Factor de actividad.....	28
1.2 Antecedentes	29
1.3 Identificación del problema.....	37
1.4 Objetivos de investigación	38
1.4.1 Objetivo general	39
1.4.2 Objetivos específicos.....	39
1.5 Alcance.....	39
1.6 Metodología	41
1.7 Contenido de la investigación.	44
2. Estimación del inventario de emisiones bajo metodología Bottom – Up.....	45
2.1 Metodología de cálculo del inventario de emisiones enfoque bottom – up.	46
2.2 Modelo Privado de Transporte – Secretaría Distrital de Movilidad (SDM).	47
2.2.1 Información extraída del modelo de transporte.	53
2.3 Red vial	54
2.3.1 Corrección malla vial local.....	54
2.3.2 Malla vial definitiva.....	57
2.4 Factores Hora Pico (FHP)	57
2.5 Actividad vehicular - VKT.....	61
2.6 Velocidades	64
2.7 Parque automotor	66

2.7.1	Clasificación del parque automotor según segmento europeo.	70
2.7.2	Clasificación normativa Euro	72
2.7.3	Distribución tecnológica del parque automotor de Bogotá D.C.....	73
2.8	Factores de emisión de COPERT V	74
2.8.1	Parámetros	77
2.9	Resultados Inventario de Emisiones	78
2.10	Análisis y comparación con estudios previos.	87
3.	Inventario de emisiones bajo metodología Top – Down.	95
3.1	Estimación de consumo efectivo de combustible.	96
3.2	Factores de emisión ponderados para Bogotá D.C.	98
3.3	Validación de emisiones de CO2	100
3.3.1	Emisiones de CO2 por estequiometria.	100
3.3.2	Emisiones de CO2 por a partir de los FE de la UPME.	101
3.3.3	Emisiones de CO2 de los contaminantes criterio a partir de los FE de COPERT V.....	102
3.4	Análisis y comparación de resultados.	103
4.	Modelación de escenarios de reducción de emisiones.	105
4.1	Escenarios de variación de oferta de infraestructura.....	106
4.1.1	Escenarios Oferta Base – Demanda Futura (2021 – 2026).	109
4.1.2	Escenarios Oferta Futura – Demanda Futura (2021 – 2026).....	110
4.1.3	Análisis y comparación de escenarios de infraestructura vial.....	111
4.2	Escenarios de programas de restricción a la circulación vehicular.....	113
4.2.1	Restricción a la circulación automóviles (Pico y placa).....	114
4.2.2	Restricción a la circulación motocicletas (Pico y placa).	115
4.3	Escenarios de chatarrización de flota.	115
4.3.1	Chatarrización de camiones.....	116
4.3.2	Chatarrización de automóviles.	116
4.4	Escenarios de tecnología vehicular eléctrica y de bajas emisiones.....	118
4.4.1	Taxis.	119
4.4.2	Transporte Escolar.....	119
4.4.3	Camiones.	120
4.4.4	Motos.....	121
4.5	Escenarios de salida de circulación del SITP Provisional.....	121
4.6	Discusión de resultados.....	122
5.	Conclusiones y recomendaciones	127
5.1	Conclusiones	128
5.2	Pregunta de investigación e hipótesis.....	131
5.3	Limitaciones de la investigación.	132
5.4	Futuras investigaciones.	133
6.	Referencias	135
A.	Anexo: Factor Hora Pico.	143

B. Anexo: Distribución tecnológica parque automotor.	147
C. Anexo: Resultados inventario de emisiones Bottom - Up.	155
D. Anexo: Resultados modelación de escenarios.	167

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Distribución modal de los viajes en Bogotá D.C.	30
Figura 1-2. Cantidad de vehículos motorizados por cada 1000 habitantes por estrato socioeconómico en Bogotá.	31
Figura 1-3. Flujograma de metodología de trabajo de investigación.....	43
Figura 1-4. Diagrama de contenido de la investigación.	44
Figura 2-1. Diagrama de contenido de la investigación – Capítulo 2.....	45
Figura 2-2. Superposición de áreas de influencia consolidadas de proyectos de infraestructura (obras de gran impacto).	50
Figura 2-3. Superposición de arcos de densificación consolidados.....	50
Figura 2-4. Puntos de control para volúmenes vehiculares.	52
Figura 2-5. Georreferenciación de malla vial del modelo privado de transporte.	55
Figura 2-6. Corrección de malla vial local.....	56
Figura 2-7. Distribución porcentual de tipo de vía para inventario base.	57
Figura 2-8. Categorización de la malla vial de la ciudad en el modelo de transporte y localización de estaciones maestras para estimación de emisiones.	59
Figura 2-9. Variación diaria del Factor Hora Pico según categoría vehicular.....	60
Figura 2-10. Comparación FHP motocicletas en comparación con Mangones (2017).	60
Figura 2-11. Distribución porcentual de actividad vehicular en malla vial de Bogotá.....	62
Figura 2-12. Comparación actividad vehicular estudio Mangones (2017).....	63
Figura 2-13. Distribución de velocidad a lo largo del día.....	65
Figura 2-14. Histograma de velocidades.	65
Figura 2-15. Información de velocidades contenidas en el visor de PowerBI.....	66
Figura 2-16. Identificación de datos atípicos en registros del parque automotor.	68
Figura 2-17. Año modelo del parque automotor.....	69
Figura 2-18. Distribución tecnológica principal del parque automotor.....	74
Figura 2-19. Archivo ráster de pendientes para selección de FE.....	77
Figura 2-20. Distribución interna de emisión por contaminante para cada categoría vehicular.....	79
Figura 2-21. Distribución de emisión por categoría vehicular para cada contaminante (comparación VKT).	80

Figura 2-22. Distribución temporal del tráfico relacionada con la emisión de CO.	82
Figura 2-23. Distribución espacial de las emisiones de CO relacionadas con el tráfico.....	84
Figura 2-24. Distribución de las emisiones según el tipo de vía.	85
Figura 2-25. Distribución espacial de las emisiones de CO en la malla vial.	86
Figura 2-25. Curva de emisión para camiones a gasolina sin norma (convencionales) menores a 3.5 toneladas para COV (Modelo COPERT V).	89
Figura 2-26. Curva de emisión para vehículos livianos a gasolina euro 1 para CO (Modelo COPERT V).	90
Figura 2-28. Distribución tecnológica de la flota vehicular entre 2015 y 2019.	92
Figura 3-1. Diagrama de contenido de la investigación – Capítulo 3.....	95
Figura 4-1. Diagrama de contenido de la investigación – Capítulo 4.....	105
Figura 4-2. Corredores intervenidos por obras de gran impacto para 2022.....	108
Figura 4-3. Comparación de emisión de CO2 escenarios de infraestructura.	112
Figura 4-4. Comparación de emisión entre línea base y pico y placa de autos.	114
Figura 4-5. Comparación de emisión entre línea base y pico y placa de motos.	115
Figura 4-6. Comparación de emisión entre línea base y chatarrización de autos.	117
Figura 4-5. Programas de electrificación de flota escolar, camiones y motos.....	118
Figura 4-6. Programas de electrificación de flota SITP, oficial y Taxis.....	118
Figura 4-9. Comparación de emisión entre línea base y camiones eléctricos y de bajas emisiones.	120
Figura 4-10. Comparación espacial de emisiones de PM2.5 entre 2019 y 2026.....	124
Figura 4-11. Comparación espacial de emisiones de CO entre línea base y escenario de pico y placa en automóviles.....	125
Figura 4-12. Comparación espacial de emisiones de CO entre línea base y escenario de chatarrización de automóviles.....	126

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Resumen de Zonas de Análisis de Tráfico (ZAT).....	51
Tabla 2-2. Características del modelo de tráfico para Bogotá en el año 2019.....	53
Tabla 2-3. Información extraída del modelo de tráfico para Bogotá en el año 2019.	53
Tabla 2-4. FHP para cada categoría vehicular.	58
Tabla 2-5. Resumen actividad vehicular para inventario base según categoría vehicular..	61
Tabla 2-6. Comparación entre distribución porcentual tipología vial y actividad vehicular.	62
Tabla 2-7. Comparación actividad vehicular estudio Mangones (2017).	63
Tabla 2-8. Distribución final parque automotor.	70
Tabla 2-9. Clasificación del parque automotor de Bogotá según segmento europeo.	71
Tabla 2-10. Clasificación normativa europea de emisiones para el estudio.	73
Tabla 2-11. Características de combustible asumido para la presente investigación.	76
Tabla 2-12. Resultados inventario de emisiones Bottom – Up (Ton métricas /año).	78
Tabla 2-13. Distribución porcentual de las emisiones según tipo de combustible.	82
Tabla 2-14. Porcentaje de emisiones diarias en cada localidad de Bogotá D.C.	83
Tabla 2-15. Resultados estudios recientes para emisiones de fuentes móviles (Ton/año) .	87
Tabla 3-1. Consumo efectivo combustible del parque automotor.	98
Tabla 3-2. Factores de emisión ponderados Top – Down (g / kg combustible).	99
Tabla 3-3. Emisiones anuales de CO ₂ por estequiometría a partir de consumo efectivo de combustible.	101
Tabla 3-4. Emisiones anuales de CO ₂ por FE UPME a partir de consumo efectivo.....	102
Tabla 3-5. Emisiones anuales de CO ₂ por FE ponderados COPERT V a partir de consumo efectivo.....	102
Tabla 3-6. Consolidado chequeo emisiones de CO ₂	103
Tabla 3-7. Consolidado de las emisiones bajo enfoque Top – Down (Ton/año).....	104
Tabla 4-1. Cronograma contemplado para los escenarios modelados.....	108
Tabla 4-2. Resultados de emisiones de escenario de infraestructura Oferta Base – Demanda Futura (ton/año)	110
Tabla 4-3. Diferencias porcentuales de emisiones entre línea base y escenario de infraestructura Oferta Base – Demanda Futura (ton/año).....	110

Tabla 4-4. Resultados de emisiones de escenario de infraestructura Oferta Futura – Demanda Futura (ton/año)	111
Tabla 4-5. Diferencias porcentuales de emisiones entre línea base y escenario de infraestructura Oferta Futura – Demanda Futura (ton/año)	111
Tabla 4-6. Resultados emisiones escenario pico y placa autos (ton/año)	114
Tabla 4-7. Resultados emisiones escenario pico y placa motos (ton/año).....	115
Tabla 4-8. Resultados emisiones escenario de chatarrización camiones (ton/año)	116
Tabla 4-9. Resultados emisiones escenario de chatarrización autos (ton/año).....	117
Tabla 4-10. Resultados emisiones escenario de taxis eléctricos (ton/año)	119
Tabla 4-11. Resultados emisiones escenario de transporte escolar eléctrico (ton/año)....	119
Tabla 4-12. Resultados emisiones escenario de camiones eléctricos (ton/año).....	120
Tabla 4-13. Resultados emisiones escenario de motos eléctricas (ton/año)	121
Tabla 4-14. Resultados emisiones escenario de desmonte SITP Provisional (ton/año) ...	122
Tabla 4-15. Comparación de porcentajes de reducción de escenarios modelados.	123

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>AEMA</i>	Agencia Europea del Medio Ambiente
<i>BRT</i>	Bus Rapid Transit
<i>CO2</i>	Dióxido de carbono
<i>COPERT</i>	Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport
<i>EEA</i>	European Environment Agency
<i>EMEP</i>	European Monitoring and Evaluation Programme
<i>EPA</i>	Environmental Protection Agency
<i>FE</i>	Factor de Emisión
<i>FHP</i>	Factor Hora Pico
<i>GEI</i>	Gases Efecto Invernadero
<i>GNC</i>	Gas Natural Comprimido
<i>GNV</i>	Gas Natural Vehicular
<i>IDU</i>	Instituto de Desarrollo Urbano (Bogotá)
<i>INS</i>	Instituto Nacional de Salud
<i>IVE</i>	International Vehicle Emissions
<i>MOBILE</i>	Mobile Source Emission Factor Model
<i>MOVES</i>	Motor Vehicle Emission Simulator
<i>NO</i>	Monóxido de nitrógeno
<i>NOX</i>	Óxidos de nitrógeno
<i>NO2</i>	Dióxido de nitrógeno
<i>OMS</i>	Organización Mundial de la Salud
<i>ONSV</i>	Observatorio Nacional de Seguridad Vial
<i>PDDAB</i>	Plan Decenal de Descontaminación del Aire
<i>PIB</i>	Producto Interno Bruto
<i>PLMB</i>	Primera Línea del Metro de Bogotá D.C
<i>PM</i>	Material Particulado
<i>PMT</i>	Plan de Manejo de Tráfico
<i>POT</i>	Plan de Ordenamiento Territorial
<i>RUNT</i>	Registro Único Nacional de Tránsito
<i>SDA</i>	Secretaría Distrital de Ambiente (Bogotá)
<i>SDM</i>	Secretaría Distrital de Movilidad (Bogotá)
<i>SICOM</i>	Sistema de Información de Comercialización de Combustible
<i>SITP</i>	Sistema Integrado de Transporte Público
<i>SO2</i>	Dióxido de Azufre
<i>TPC</i>	Transporte Público Colectivo

Abreviatura Término

<i>UAECD</i>	Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (Bogotá)
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética
<i>VDF</i>	Volume Delay Function
<i>VKT</i>	Vehicle Kilometres Travelled
<i>VOC</i>	Compuestos Orgánicos Volátiles
<i>ZAT</i>	Zonas de Análisis de Transporte

1. Introducción

Bogotá tiene una población aproximada de 7.2 millones de habitantes (DANE, 2018) y un área aproximada de 380 Km^2 . La densidad poblacional en el casco urbano es de 21,000 hab/km^2 , ubicando a Bogotá como una megaciudad, la 39 ciudad más densa del mundo y la primera en América Latina (Organización Naciones Unidas, 2018).

Para 2019 en el mundo se produjeron alrededor de 6.67 millones de fallecimientos relacionados con la contaminación atmosférica, siendo este el cuarto factor de riesgo principal de muerte prematura, superado solo por la presión arterial alta, el consumo de tabaco y la mala alimentación (Health Effects Institute, 2020). En Bogotá, la polución atmosférica en los primeros 9 meses del año 2020 provocó 3,900 fallecimientos, representando un costo aproximado de USD 1,300 millones (Greenpeace, 2020).

Las emisiones por fuentes móviles que son liberadas a la atmósfera son una de las principales causas del deterioro de la calidad del aire en el país, provocando consecuencias en la salud pública de sus habitantes reflejadas en varios tipos de enfermedades (Dora et al., 2011). Sumado a esto el incremento del consumo de combustibles fósiles del sector transporte y el aumento de la flota vehicular, hacen que este problema sea de prioridad y de interés en la agenda pública (Ramirez et al., 2019).

La presente investigación plantea la estimación del inventario actualizado de fuentes móviles para el caso de estudio de la capital colombiana, tomando como referencia un modelo de transporte que brinde datos precisos sobre los patrones de flujo en la ciudad dentro la red vial. Con esta información, la actualización de factores de emisión extraídos de Copert V y la definición de la distribución tecnológica del parque automotor, se pretende

marcar un punto de referencia que será validado por medio de la estimación de un inventario con enfoque Top – Down a partir del consumo de combustible por parte de los vehículos en Bogotá.

Finalmente, esta validación permitirá evidenciar la reducción de emisiones al afectar variables de la oferta del sistema de transporte y verificar la hipótesis planteada por la investigación.

En este apartado se presentan seis secciones: marco teórico, antecedentes, identificación del problema, objetivos de la investigación, alcance e hipótesis y finalmente, la metodología de investigación.

1.1 Marco Teórico

En diversas regiones del mundo, la contaminación del aire se ha convertido en un problema grave debido a la rápida industrialización y urbanización (Barbera et al., 2010). En promedio, las concentraciones de los contaminantes atmosféricos son altas en las ciudades en vía de desarrollo, donde el transporte es una de las principales fuentes de deterioro de la calidad del aire que directamente tienen grandes consecuencias en la salud pública de sus habitantes (Dora et al., 2011).

1.1.1 Fuentes móviles de contaminación.

Existen varios tipos de fuentes principales de emisión de contaminantes. Las fuentes puntuales fijas (industriales y comerciales); fuentes fijas de área, representadas por ejemplo con los centros de almacenamiento de combustibles y, las fuentes móviles. De igual forma, se presentan emisiones a partir de otros factores como el sector de la construcción, los incendios forestales y la resuspensión de material particulado por la actividad vehicular sobre la infraestructura de transporte, el desgaste de los sistemas de frenado y los neumáticos.

No obstante, las fuentes móviles emiten directa o indirectamente la mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera en Colombia (Ramirez et al., 2019). Una fuente móvil es toda fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse. En las fuentes móviles se incluyen los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p. 251).

De acuerdo con el tipo de operación se tienen las fuentes móviles en ruta y fuera de ruta. Las fuentes móviles en ruta encajan cualquier tipo de vehículo que opere normalmente en carreteras, para el transporte de pasajeros o de carga; vehículos particulares, de transporte público y de transporte de mercancías. En contraste, las fuentes móviles fuera de ruta comprenden unidades de transporte aéreo, transporte ferroviario, maquinaria de construcción o maquinaria amarilla, maquinaria agrícola, maquinaria industrial, transporte marítimo y fluvial.

Característicamente las fuentes de emisión en ruta son las principales generadoras de contaminación del aire en áreas urbanas, además, son de las más complicadas de cuantificar debido a la cantidad y diversidad tecnológica y de patrones de conducción de los vehículos involucrados (Rojas, 2015, p. 28).

Esta clase de emisiones se pueden derivar de tres situaciones en particular; emisiones en caliente (condiciones de operación estable del motor), emisiones por partidas en frío y emisiones evaporativas del combustible en el tanque de almacenamiento y en los sistemas de transporte hacia el motor (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009, p.82-p.81).

1.1.2 Inventario de emisión.

Existen diferentes procesos para identificar la magnitud de la contaminación atmosférica por fuentes móviles de una determinada ciudad, región o país. El más fuertemente utilizado es el establecimiento de inventarios de emisiones, cuyo resultado es una base de datos consolidada por sector, tipo de fuente o tipología de contaminante, que puede estar desagregada temporal y/o espacialmente (Linton et al., 2015; Gaitán et al., 2017).

Este proceso de estimación es complejo, debido a que requiere de una cantidad considerable de información sobre dos conjuntos de datos. En primera instancia, la actividad vehicular, que está en función de variables propias del parque automotor y las condiciones de tráfico de la zona de estudio donde se producen las emisiones (distancia vehicular recorrida, tecnología de la flota y condiciones de operación). En segundo lugar, un conocimiento profundo sobre las tasas a las que los automóviles liberan contaminantes al aire, es decir, los factores de emisión.

Por consiguiente, la calidad y validez en los inventarios de emisiones son dependientes en gran medida de la confiabilidad tanto de las tasas de emisión como de la actividad vehicular (European Environment Agency, 2019, p.14). En definitiva, los inventarios de emisiones contaminantes son herramientas de soporte para la identificación de fuentes potenciales de contaminación y la aplicación de programas de gestión de calidad del aire, porque permiten realizar el seguimiento a posibles escenarios, evaluaciones retrospectivas y los impactos asociados (Rojas, 2015, p. 27).

Existen varios enfoques para la estimación y validación de los modelos implementados en la definición de inventarios de fuentes móviles (Lents et al., 2011). El método Top – Down es usado a gran escala, pues necesita poca información, un tiempo reducido de ejecución y se enfoca en el establecimiento de las emisiones a partir de análisis estadísticos de datos de actividad junto con factores de emisión particulares (Reis et al., 2004; Carmona et al., 2016; Cheewaphongphan et al., 2019).

Por otro lado, la metodología Bottom – Up, empleada en la estructuración principal del presente trabajo investigativo, estima las emisiones a pequeñas escalas, a partir de datos empíricos, reales y locales con mayor nivel de detalle, como características de la red vial y de los flujos vehiculares (Reis et al., 2004; Carmona et al., 2016; Cheewaphongphan et al., 2019). Según Reis et al., (2004), este enfoque es apropiado para escala pequeñas (nivel ciudad).

La metodología base para la estimación se describe por medio de la Ecuación 1-1:

Ecuación 1-1. Metodología base para estimación de inventarios de emisiones de fuentes móviles en ruta.

$$E_k = \sum_k FE_k \times VKT_K \times FV_K \quad (\text{EEA, 2021})$$

- E_k = Emisiones totales de un contaminante para (masa/tiempo).
- FE_k = Factor de emisión para el tipo de vehículo k, (masa/longitud).
- VKT_K = Actividad vehicular. Distancia recorrida por vehículo k en un periodo específico.
- FV_K = Flota vehicular total por categoría vehicular (número de vehículos)

1.1.3 Factores de emisión.

La construcción de inventarios de emisiones de fuentes móviles requiere de factores de emisión (FE) e información de actividad vehicular (Ecuación 1-1). Estos factores de emisión son valores que relacionan la cantidad de un compuesto que es emitido a la atmósfera, y una unidad de actividad o del proceso (Velasco & Bernabe, 2004). Este factor generalmente se expresa como la cantidad de contaminante liberado a la atmósfera con relación a la cantidad de combustible consumido o a la distancia recorrida (Gaitán et al., 2017).

Las técnicas directas para la obtención de factores de emisión vehiculares se basan en mediciones en la fuente y son representadas por la medición a bordo, pruebas dinamométricas y técnicas de detección remota (Rojas, 2015). En la medición directa a bordo se utilizan analizadores de emisiones de gases durante la operación estable de los vehículos. De igual forma, en vehículos a gasolina y motocicletas se aplican las pruebas dinamométricas. Por otro lado, para el caso de los vehículos a diésel, se pueden obtener a través de un banco de pruebas para motores pesados. (Gaitán et al., 2017).

Finalmente, los FE pueden ser extraídos de forma indirecta mediante modelos de emisión, documentos compilatorios de bases de datos, ser estimados por un balance de masa, estudios e investigaciones de alcance nacional, donde se tome en consideración la tipología y tecnología vehicular y, de igual forma, es posible estimarlos a partir de resultados de concentración obtenidos de estaciones de monitoreo.

1.1.4 Modelos de emisión.

Existen varios de modelos de emisión que a la actualidad han sido usados ampliamente para obtener inventarios de emisiones de fuentes móviles. Entre ellos se encuentra el modelo COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport), el modelo MOBILE (Mobile Source Emission Factor Model), posteriormente transformado al modelo MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) y el modelo IVE (International Vehicle Emissions) (Y. Li et al., 2019).

El modelo MOBILE fue establecido por primera vez por la EPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos) en 1978, y la última versión, MOBILE 6.2, fue lanzada en 2004. Este modelo se aplicó en el desarrollo estatal de inventarios en Estados Unidos y en países donde predominaban los vehículos con tecnología norteamericana, como México, además, este modelo contemplaba factores de emisión promedio para vehículos automotores de gasolina, diésel y gas natural, en una amplia variedad de condiciones geográficas y de características de la flota vehicular (Guzmán, 2014).

Posteriormente, el modelo MOBILE fue reemplazado por el modelo MOVES por parte de la EPA de Estados Unidos, debido a nuevos requerimientos en el procesamiento y análisis de emisiones vehiculares (Y. Li et al., 2019). Fundamentado en el modelo MOBILE y NONROAD, este último dedicado a las fuentes móviles que no circulan por carreteras (F. Li et al., 2019), MOVES facilita el cálculo emisiones para un amplio número de contaminantes a múltiples escalas de análisis que van desde intersecciones viales hasta la estimación de un inventario nacional (Guzmán, 2014).

Este modelo se usó en la evaluación de las emisiones de fuentes móviles por hora en el área metropolitana de la Ciudad de México (Guevara et al., 2017). Sin embargo, cuando MOVES se usa en otros países diferentes de los EE. UU, es necesario ingresar una gran cantidad de parámetros y variables locales (F. Li et al., 2019). Por consiguiente, el modelo MOVES tiene la capacidad de estimar los cambios en los factores de emisión relacionados con la variación de combustible, la antigüedad vehicular, la composición de la flota y del parque automotor y la meteorología local (Zhao et al., 2013).

Por otro lado, el modelo IVE, fue desarrollado por el Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sostenibles (ISSRC) y la Universidad de California Riverside (UCR) especialmente para países en desarrollo (F. Li et al., 2019). Este modelo ha sido aplicado en varios países en desarrollo, como por ejemplo, Irán (Shafabakhsh et al., 2018) y Colombia (Behrentz et al., 2009). Sin embargo, en comparación con MOBILE y COPERT, la precisión y fiabilidad del modelo IVE es menor (F. Li et al., 2019).

Por último, el modelo COPERT es un modelo de emisión de vehículos a escala macro apoyado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) y desarrollado por el Laboratorio de Termodinámica Aplicada en la Universidad Aristóteles de Tesalónica (Geseaur, 2015), siendo el modelo de emisión de vehículos más utilizado en Europa (F. Li et al., 2019). Este modelo tiene una clasificación detallada de la tipología del vehículo, permitiendo su compatibilidad con vehículos que tienen diferentes estándares de control de emisiones (Jaikumar et al., 2017).

El principio de cálculo del modelo COPERT se basa en el factor de emisión básico, donde el coeficiente de corrección es usado para calcular el factor de emisión del vehículo en condiciones reales. Para reflejar los niveles de emisión de vehículos de diferentes países y regiones, el modelo COPERT puede calcular el factor de corrección sobre la base de la información local ingresada por el usuario y obtener un inventario de emisiones localizado (F. Li et al., 2019).

A grandes rasgos, los modelos MOBILE, COPERT e IVE son adecuados para estimar las emisiones de fuentes móviles a nivel nacional y a nivel de ciudad, sin embargo, no pueden utilizarse para la evaluación de emisiones a escala local (Pulíafito et al., 2015).

1.1.5 Factor de actividad.

Un insumo fundamental al igual que los factores de emisión (FE) es la actividad vehicular. Este factor como se mencionó anteriormente está en función de variables propias del parque automotor y las condiciones de tráfico de la zona de estudio donde se producen las emisiones (distancia vehicular recorrida, tecnología de la flota y condiciones de operación). La actividad vehicular generalmente se obtiene a partir de datos promedio proporcionados por encuestas o se asume en base a datos de conducción agregados por tipo de vehículo.

Recientemente para la estimación de la actividad vehicular se ha inspeccionado información de los reportes de los Centros Diagnóstico Automotor (CDA) de Bogotá; específicamente de datos del kilometraje por vehículo. A partir de esta información se efectúan procesos de desagregación por categoría vehicular estableciendo el valor de kilometraje promedio al año a partir del tiempo efectivo en operación según el año modelo del vehículo (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020). Lo anterior, asumiendo que todos los años los vehículos recorren distancias similares.

Estas metodologías de estimación del factor actividad no logran representar las condiciones de tráfico a nivel de tramo de vía con variación horaria. Por este motivo, surgen nuevos enfoques de estimación de la actividad como la implementación de modelos de transporte que brinden información certera sobre los flujos vehiculares a nivel de enlace y que permitan realizar una posterior desagregación espacio – temporal de las emisiones resultantes en los inventarios establecidos. La estimación del factor actividad mediante modelos de transporte adiciona confiabilidad en el proceso de estimación de inventarios de fuentes móviles, al efectuar el producto entre la longitud de enlace de vía y el flujo efectivo de tráfico que circula en esa distancia.

1.2 Antecedentes

Bogotá tiene más de 7 millones de habitantes, lo que la convierte en la ciudad más grande de Colombia y en la quinta ciudad más grande de la región latinoamericana. Así mismo, esta ciudad es considerada una de las centros urbanos más contaminados atmosféricamente de América Latina (Vargas et al., 2012).

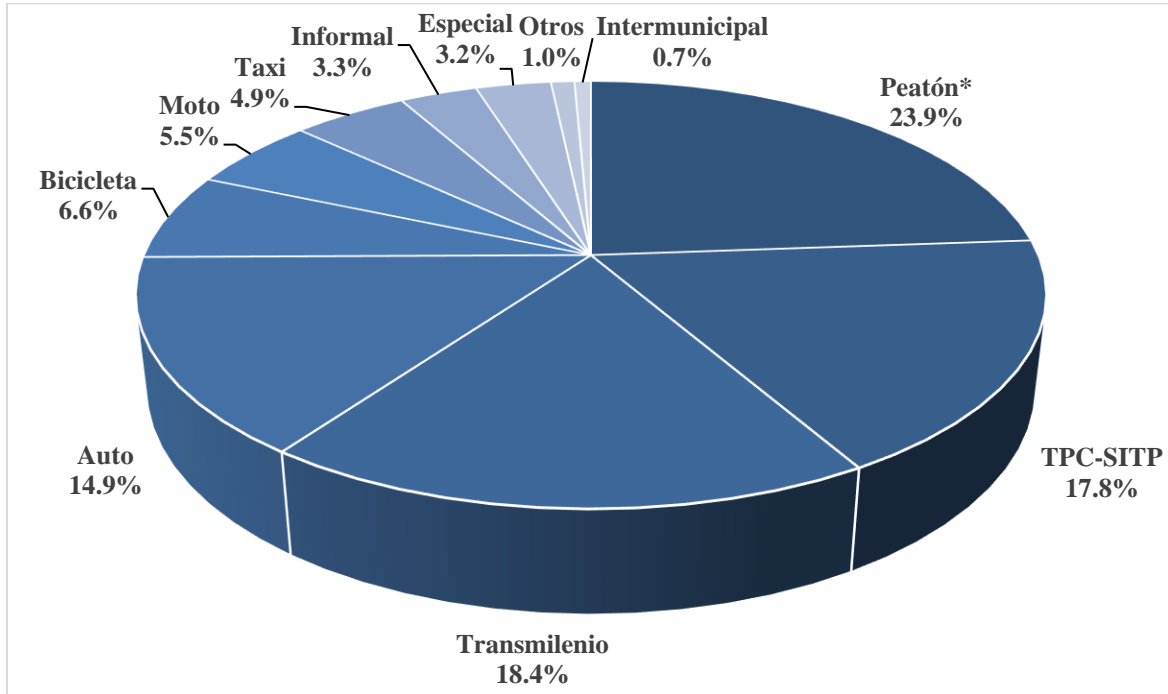
La urbanización es un proceso espacio temporal físico y socioeconómico que transforma el paisaje rural en urbano (Han et al., 2009; Thapa et al., 2010). En la actualidad, las áreas urbanas ocupan solo el 5% de la superficie terrestre y albergan a casi la mitad de la población mundial, que consume el 75% de los recursos naturales del mundo y genera una proporción equivalente de contaminación y desechos (Netzband et al., 2007).

Bogotá al igual que otras ciudades, tuvo gran parte de su crecimiento urbano durante los últimos siglos de manera no planificada e informal (Andrade et al., 2013). La expansión urbana no planificada se asocia principalmente con una dependencia cada vez mayor de vehículos privados (Festus et al., 2020), empeorando la calidad del aire urbano, que es uno de los principales problemas en los países en vía de desarrollo (Gulia et al., 2015).

Más del 70 - 80% de la contaminación del aire en las grandes ciudades de los países en vía de desarrollo se atribuye a las emisiones de fuentes móviles causadas por una gran cantidad de vehículos antiguos junto con un mantenimiento deficiente de los mismos, una infraestructura vial inadecuada y una baja calidad del combustible (Wang, Fu et al., 2010).

Según la última Encuesta de Movilidad realizada en Bogotá para el año 2019, en la Región Metropolitana se realizan aproximadamente 16 millones de viajes y en el casco urbano principal 13,359,728 viajes. Partiendo de la distribución modal representada en la Figura 1-1, tan solo el 20.4% de los viajes se realizan en vehículo particular; 14.9% en automóvil y 5.5% en motocicleta. En contraste, según la encuesta, el 67% de los viajes se realizan en modos sostenibles y, los desplazamientos en Transporte Público representan alrededor de 41.1% (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019).

Figura 1-1. Distribución modal de los viajes en Bogotá D.C.



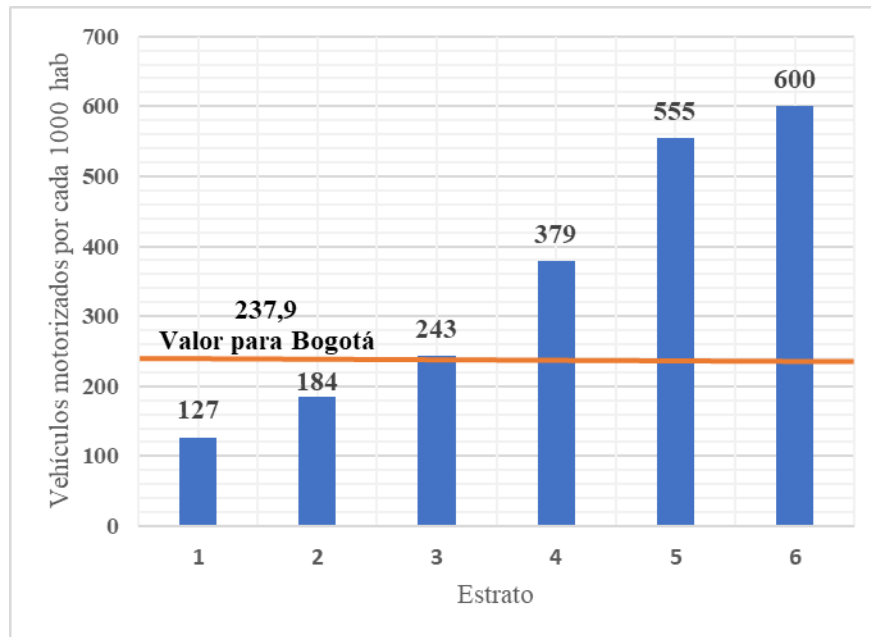
Fuente: Encuesta de Movilidad de Bogotá (SDM, 2019).

Además, según el último inventario realizado para el parque motorizado de Bogotá, la tasa de motorización en la ciudad se aproxima a los 238 vehículos por cada 1,000 habitantes (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019). De igual forma, la encuesta estima en total 1'092,287 vehículos particulares (automóvil, campero, camioneta y pick up/van) y 495,755 motocicletas; las últimas con una tasa de motorización de 55.5 por cada 1,000 habitantes en la ciudad.

Estas tasas de motorización reflejan una tendencia cada vez mayor al uso de los vehículos particulares por parte de los ciudadanos para llevar a cabo sus desplazamientos, de ahí que se incremente las emisiones contaminantes. Esta tendencia se ha visto reflejada en los estudios realizados para la capital colombiana, que establecen a las fuentes móviles como la principal causa de emisión de contaminantes al aire de la ciudad (Peñaloza, 2010; Beltran et al., 2012). Según el último inventario de emisiones de Bogotá y tomando como referencia

el material particulado 2.5, el 79% de la contaminación corresponde a la actividad del tráfico (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

Figura 1-2. Cantidad de vehículos motorizados por cada 1000 habitantes por estrato socioeconómico en Bogotá.



Fuente: Encuesta de Movilidad de Bogotá (SDM, 2019).

Ahora bien, estos valores de referencia de contaminación han sido establecidos a partir de la estructuración de inventarios y el uso de factores de emisión en la ciudad. Bogotá D.C, se ha caracterizado por no contar directamente con tasas de contaminación estimadas a diferencia de otros lugares en la región.

En América Latina, ciudades como Londrina (Brasil) han medido FE para estimar $PM_{2.5}$ y NO_x (Krecl et al., 2018). En Santiago de Chile (Chile), se estimaron FE para COV (Compuestos Orgánicos Totales), CO y NO_x , en función de la velocidad promedio, así como también, las concentraciones de THC (Hidrocarburos totales), CO y NO_x , para vehículos de gasolina de tipo privado y comercial (Taylor et al., 2011).

Así mismo, en la ciudad de Sao Paulo (Brasil), se obtuvieron factores para CO_2 , CO , NO_x y $PM 2.5$ a partir de mediciones de contaminación de aire sobre vehículos dentro de dos túneles de la región metropolitana en la ciudad (Miranda et al., 2014).

Por tanto, a falta de mediciones directas de los factores de emisión (FE) para los principales contaminantes en Colombia, los inventarios de emisiones obtenidos a nivel nacional a lo largo de los años se han basado en factores de emisión medidos en otros países o factores simulados con modelos de emisión (Ramírez et al., 2019). Esto a su vez reduce la confiabilidad de los resultados, debido a que son necesarios valores y/o funciones de tasas de emisión precisas que permitan establecer puntos de referencia para el planteamiento de programas de gestión de la calidad del aire.

Con el paso del tiempo y el avance tecnológico que se ha producido con este, Bogotá al igual que el país cuenta con FE obsoletos y desactualizados medidos directamente que no reflejan la actualidad de la flota, de los combustibles y de las condiciones de tráfico. Un ejemplo particular de la situación expuesta se presenta con la aplicación de los factores de emisión que se extrajeron del modelo IVE para el desarrollo del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá (PDDAB) por parte de la SDA para el año 2008 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010). Estos factores establecidos quedaron desactualizados con la expedición de la Ley 1205 de 2008¹ donde se reduce el contenido de azufre a nivel nacional de 1,000 a 500 ppm para 2008 y luego en el 2010, esta concentración se estableció en 50 ppm. Así mismo, con la implementación del modelo de emisiones IVE no son consideradas variables como la edad de los vehículos para algunas tipologías (Ramírez et al., 2019).

Posteriormente, mediante la suscripción del Contrato 1467 de 2013, celebrado entre la Secretaría Distrital de Ambiente y la Universidad de La Salle, se desarrolló e implementó un modelo de calidad del aire para Bogotá, donde se actualizó el inventario de emisiones de

¹ Por medio de la cual se mejora la calidad de vida a través de la calidad del diésel y se dictan otras disposiciones.

fuentes móviles para la ciudad con corte a diciembre de 2012, en base al inventario del año 2008, con dos enfoques principales, “Top-Down” y “Bottom-Up”, para su posterior comparación junto con el inventario de emisiones que se tenía para junio de 2013 por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente (Pachón, 2014).

Para este estudio, en el enfoque “Top -Down” se usaron FE y factores de actividad para 38 categorías vehiculares, de las cuales 32 coincidieron con las empleadas en el Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá (PDDAB), se incluyeron 2 categorías para motos de cuatro tiempos considerando su cilindraje y 4 para buses articulados y biarticulados con tecnología de emisión de gases Euro IV y V (Carmona et al., 2016).

En el enfoque “Bottom - Up”, las emisiones se desagregaron a un nivel de detalle por hora en una resolución de 1 Km^2 , en un dominio de 55×55 celdas para toda la ciudad. De este modo, mediante la superposición de la malla de dominio con la malla vial se genera una relación de asignación de atributos como tipo de vía, flujo vehicular y uso del suelo a segmentos viales (Carmona et al., 2016).

Finalmente los FE, utilizados en esta actualización del inventario de emisiones fueron recopilados de varios estudios como, Rodríguez et al. (2009), Peñaloza (2010) y Secretaria Distrital de Ambiente (2010). Estos factores permitieron concluir que para el año 2013 las fuentes vehiculares en Bogotá emitieron aproximadamente: de 7'000,000 a 10'500,000 ton de CO_2 , 700,000 a 870,000 ton de CO ; 48,000 a 67,000 ton de NO_x ; 74,000 a 92,000 ton de VOC , 1.100 a 1,300 ton de PM y 12,000 a 14,000 ton de SO_2 .

El modelo MOVES también se ha aplicado recientemente en estudios como Ramirez et al. (2019) para la estimación de inventarios de emisiones de fuentes móviles en la ciudad. En esta investigación se establecieron FE, que incluyeron condiciones de vehículos antiguos de pasajeros que no se habían tenido en cuenta con anterioridad y que tienen altas tasas de emisión, así como también, los cambios en la composición del combustible y de la flota, obteniendo reducciones importantes en las emisiones de SO_2 .

Análogamente, el último inventario de emisiones de la ciudad con línea base 2018, se estableció utilizando MOVES, factores de emisión estimados para Bogotá por la Universidad de La Salle y, factores medidos por la SDA en convenios con la Universidad Nacional de Colombia (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

Como se mencionó con anterioridad, este modelo presenta ventajas frente a el modelo IVE, debido a su capacidad de estimar las variaciones de los FE, cuando se establezcan modificaciones en la composición de los combustibles, la edad y la composición vehicular (Guevara et al., 2017). Sin embargo, según (Ramirez et al., 2019), se debe reconocer que los vehículos de EE.UU (país origen del modelo MOVES) son grandes y tiene mayor potencia en comparación con la flota colombiana, especialmente en el caso de motocicletas, camiones y autobuses.

Por otro lado, los inventarios de emisiones existentes para la ciudad de Bogotá se han basado principalmente en enfoques “Top-Down” que combinan los factores de emisiones disponibles con números de vehículos agregados y datos de actividad (Giraldo et al., 2005; Zarate 2007; Beltran et al., 2012; Carmona et al., 2016; Ramirez et al., 2019).

Sin embargo, este tipo de estudios no representan las condiciones reales del flujo (volumen, velocidades y tiempos de recorrido) y omiten que las condiciones de la vía (congestión), así como también, los patrones de uso temporal pueden incidir en el rendimiento del vehículo y como consecuencia, en las emisiones resultantes (Mangones et al., 2019).

En Bogotá, también se han implementado metodologías “Bottom-Up” a base de modelos de macromodelación de transporte que efectúan la asignación de emisiones a la malla vial partiendo de datos y parámetros del tráfico basados en modelos de planeación de transporte y factores de emisión. Sin embargo, en la actualidad el inventario de emisiones basado en esta metodología corresponde al año 2015.

Este inventario de emisiones incluyó 5 contaminantes criterio (*CO*, *NO_x*, *SO₂*, *PM* y *VOC*), utilizó además modelos de simulación de tráfico (típicamente utilizados por agencias de planificación de transporte) para el modelado de impacto ambiental. A partir de este modelo, se definió el primer inventario de emisiones de vehículos para Bogotá, utilizando un modelo de transporte de última generación vinculado a factores de emisiones adaptados para representar las características de las flotas de vehículos en la ciudad (Mangones et al., 2019).

La adaptación se efectuó a las condiciones de Santiago de Chile y se incluyeron un total de 50 factores para estimar las emisiones a nivel de enlace como una función de velocidad promedio. Este modelo representaba mejor las características del vehículo y el combustible para Bogotá en los últimos años al ser equiparada con otra ciudad latinoamericana similar

- **Modelación de escenarios**

Ahora bien, como se mencionó con anterioridad, los inventarios de emisiones son herramientas fundamentales para la definición de estrategias de gestión de calidad del aire y para la toma de decisiones en la evaluación de programas de control e innovación para posteriormente generar y plantear posibles escenarios como alternativas de solución.

En Bogotá, se han realizado diversos estudios donde se han efectuado análisis y simulaciones de escenarios referentes a las emisiones por fuentes móviles (Zarate, 2007; Giraldo, 2005; Secretaría Distrital de Ambiente, 2010; Ramírez et al., 2019).

Entre los análisis de escenarios que han sido evaluados en la ciudad y se han enfocado al parámetro del volumen vehicular, se pueden encontrar simulaciones como la restricción parcial de la circulación de la flota de tráfico pesado mayor a 5 toneladas que no cumpliera con el programa de regulación de la ciudad (DAMA, 2006). Este programa consistía en que, si un vehículo no tenía un certificado reglamentario aprobado, no se le permitía correr un día de cada diez, de acuerdo con el último número de la placa. En pocas palabras, se simuló que el 10% del tráfico pesado total no se ejecutara en la ciudad (Zarate, 2007).

Otro escenario evaluado fue la eliminación del 20% de los autobuses que estaban en circulación (Zarate, 2007), debido a una sobreoferta de autobuses en Bogotá, calculada en alrededor del 20% (Giraldo, 2005). Un tercer escenario, representó un intento de evaluar el impacto de una medida combinada que consistía en la renovación de la flota de autobuses y la mejora de la calidad del diésel (Zarate, 2007).

Así mismo, se han realizado análisis de escenarios de los factores que intervienen en la estimación de inventarios de emisiones de fuentes móviles como la flota vehicular y la calidad del combustible. Por ejemplo, mejorando la calidad del diésel (disminuyendo el contenido de azufre del combustible), se tuvo una reducción en las emisiones de PM de 45% y del 65% en el SO_x (Giraldo, 2005).

También se han simulado escenarios combinados de renovación de la flota de buses con mejoramiento del diésel, escenarios basados en el requerimiento de catalizadores para todas las motos de la ciudad, el cambio de taxis y colectivos a gas natural, comparación de vehículos duales y dedicados exclusivamente a gas natural y el cambio de combustible de diésel a gas natural para Transmilenio (Giraldo, 2005).

Por otro lado, en el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá, se realizaron análisis de escenarios para establecer el impacto de la conversión tecnológica a gas natural del parque automotor, debido a que se detectó que los beneficios ambientales que han sido asociados con la reconversión tecnológica de vehículos de gasolina a vehículos duales (gasolina – GNV) son limitados y sólo se presentan en ciertas condiciones particulares. Así mismo, esa reconversión puede acarrear efectos negativos en lo que se refiere a las emisiones de NO_x , CO y THC (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

También se han hecho análisis de escenarios para evaluar la influencia de condiciones meteorológicas y horarias del día en las estimaciones de FE (Ramírez et al., 2019), donde se encontró que la variación ante la temperatura y la humedad relativa fue insignificante, y los contaminantes como SO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$ no mostraron ningún cambio y contaminantes

como *CO* y *VOC* muestran aumentos en las horas tempranas y tardías disminuyendo al medio día.

Por último, (Ramírez et al., 2019) realizaron un análisis de escenarios donde se compararon 15 situaciones específicas de composición de combustible y se identificó que el cambio en el contenido de azufre en la gasolina genera los mayores cambios en los FE. También se observó que un contenido más bajo de azufre disminuye las emisiones de *SO₂* y mejora la combustión, reduciendo simultáneamente *VOC*, *CO*, de *NO_x* y *PM*.

1.3 Identificación del problema

Según (Lelieveld et al., 2019), las muertes prematuras producidas por efectos de la baja calidad del aire debida a la contaminación atmosférica en el mundo han ido en aumento desde los 4.5 millones hasta la estimación de 8.8 millones de personas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), esta polución sería más mortífera que los efectos del tabaco, el cual causa alrededor de 7 millones de muertes anuales.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Salud (2018) en Colombia aproximadamente 17,549 muertes corresponden a factores de riesgo ambiental, donde a la calidad del aire se le atribuye el 90% (15,861 personas), con una tasa de 620 personas afectadas por cada 100,000 habitantes. Siendo así, la mala calidad del aire es más mortal que la siniestralidad vial, problema que causó para 2018, 6,850 víctimas fatales a nivel nacional, según el Observatorio Nacional de Seguridad Vial (ONSV).

En los últimos años Bogotá ha tenido episodios de niveles altos de contaminación del aire, lo que ha vuelto a poner en la agenda la importancia de medidas para la prevención de la contaminación y mejoras en la calidad del aire (Fedesarrollo & PROBOGOTA, 2019). Según Fedesarrollo el Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá 2010- 2020 identificó que el principal problema de contaminación en Bogotá es el material particulado.

Este material particulado menor a 2.5 micras de diámetro es particularmente peligroso para la salud humana pues penetra fácilmente en las vías respiratorias. Por lo anterior, frecuentemente se asocian los niveles de concentración en el aire de este contaminante con enfermedades respiratorias (World Health Organization, 2011). Por ejemplo, según (Ortiz et al, 2013), si se hubiera logrado reducir a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ las emisiones de PM_{10} entre 2010 y 2020 en la ciudad de Bogotá, se podrían evitar 21,000 muertes para mayores de 30 años y 900 muertes en menores de un año, entre otras estimaciones.

De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación la degradación ambiental en 2015 costó 16,6 billones de pesos (equivalente al 2.1% del PIB de 2015), de los cuales cerca de 12 billones fueron producto de la contaminación del aire urbano (Departamento Nacional de Planeación, 2018a). De estos, 1.6 billones corresponden a la valoración económica de la morbilidad y 10.6 billones de la mortalidad (Departamento Nacional de Planeación, 2018b).

Para plantear alternativas que permitan reducir el impacto en términos económicos y de salud pública es fundamental contar con un inventario de emisión actualizado y valido para Bogotá, basado en información detallada de la distribución espacial de los tipos de vías, la distribución temporal de la actividad vehicular y las velocidades promedio que se tienen en los corredores urbanos (arteriales, intermedios y locales).

Este inventario debe tener un enfoque Bottom – UP y debe ser construido con información reciente y con FE actualizados, que permitan realizar un análisis de escenarios diferenciados para los contaminantes criterio y así estimar el impacto en emisiones producto de los posibles cambios en oferta del sistema de transporte como la tecnología vehicular.

1.4 Objetivos de investigación

El desarrollo del estudio buscó el cumplimiento de un objetivo general y tres objetivos específicos enfocados en tres líneas principales de trabajo; inventario de emisión, factores de emisión adaptados y actualizados y, simulación de escenarios de reducción.

1.4.1 Objetivo general

Estimar el inventario de emisiones por fuentes móviles del año 2019 para Bogotá usando la metodología bottom-up, acoplado el modelo de planeación de transporte y los factores de emisión provenientes del modelo COPERT para posteriormente evaluar diferentes escenarios de reducción.

1.4.2 Objetivos específicos

- I. Obtener un modelo de estimación del inventario de emisiones de tráfico para el año 2019, para los contaminantes criterio y CO_2 como indicador de gases de efecto invernadero (GEI).
- II. Estimar los factores de emisiones (FE) usando el modelo COPERT adaptado a las condiciones de flota y tráfico para el año 2019 de la ciudad de Bogotá.
- III. Evaluar escenarios de reducción de emisiones a partir de la variación de la tecnología vehicular, programas de restricción a la circulación vehicular y de chatarrización de flota en la ciudad de Bogotá, Colombia.

1.5 Alcance

El trabajo de investigación se establece para el año base 2019, es decir, una línea base prepandemia, caracterizada por condiciones típicas de tráfico y patrones de viaje en Bogotá D.C, Colombia. Para la presente investigación, no se establecen resultados enmarcados para el periodo 2020, a pesar del uso de información reportada para este año, como es el caso del registro del parque automotor de la ciudad y de la actualización del modelo privado de transporte.

El inventario se define utilizando como insumos las salidas de un modelo privado de transporte de la ciudad proporcionado por la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), que adicionalmente, brindó la información de 10 estaciones maestras con datos registrados para el año de partida en intersecciones distribuidas por todo el casco urbano.

Igualmente, se aplican los factores de emisión (FE) del modelo COPERT V adaptado para

las condiciones de flota y tráfico características de la ciudad. Análogamente, la distribución tecnológica del parque automotor se clasificó de acuerdo con el segmento europeo implementado por el modelo de emisión. Esta distribución está basada en la información del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) para 2020 y en datos proporcionados por Transmilenio S.A para 2020 mediante el oficio 2021-80700-CI-19588.

Se establecen las emisiones de fuentes móviles en ruta y en caliente para los flujos asociados a vehículos particulares (autos, camionetas y camperos), camiones (grandes y pequeños), taxis, motos, transporte especial, transporte escolar, transporte intermunicipal y, vehículos asociados al Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá; SITP provisional, SITP implementado, componente alimentador y componente troncal (buses articulados y biarticulados).

En el trabajo se contemplaron cambios en las variables de la oferta del sistema de transporte de la ciudad mediante la modificación de la infraestructura vial y transporte entre el 2021 y 2026. Adicionalmente, se plantearon escenarios de restricción a la circulación vehicular, de migración a tecnología vehicular eléctrica y de bajas emisiones y, por último, de chatarrización y renovación de flota. Todos los anteriores escenarios se enmarcaron en la normativa colombiana para darles consistencia.

Es importante resaltar que, únicamente se consideran variaciones en la demanda del sistema de transporte de la ciudad para la reducción de emisiones de fuentes móviles en los análisis de cambio de la oferta de infraestructura vial planteados. Por otro lado, las emisiones de fuentes móviles incluyeron a cinco contaminantes criterio, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), material particulado ($PM_{2.5}$) y compuestos orgánicos volátiles (VOC). Así mismo, se incluyó el CO_2 , como indicador de Gases Efecto Invernadero (GEI).

Para la validación de los resultados del inventario en la ciudad, se estableció un inventario con un enfoque Top – Down y la verificación de las emisiones de (CO₂), a partir del consumo de combustible.

Finalmente, el análisis de escenarios permitirá verificar la hipótesis de la investigación estableciendo si los cambios sobre las variables de la oferta del sistema de transporte pueden reducir un 15% las emisiones de fuentes móviles en la ciudad.

1.6 Metodología

Para esta investigación se tomó como punto de partida el modelo de alta resolución generado en el estudio de (Mangones et al., 2019) por medio del cual se estableció el inventario de emisiones por fuentes móviles de Bogotá en el 2015. En el presente estudio, se integraron las salidas de la actualización del modelo privado de transporte de la ciudad enmarcado dentro del contrato 2020-193 entre la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) y la Universidad Nacional de Colombia.

Estos “*Outputs*” fueron inspeccionados, analizados, verificados, filtrados y optimizados para posteriormente integrarlos con unos factores extraídos de un modelo de emisión europeo. Estos Factores de Emisión (FE) se aplicaron en función de la velocidad de recorrido a nivel enlace, obteniendo las emisiones por fuentes móviles de cinco contaminantes criterio y un contaminante representativo de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Desglosando lo anteriormente mencionado, previo a la estimación final del inventario, se desagregaron los flujos vehiculares a nivel enlace de la hora pico de la ciudad y se replicaron para las 24 horas efectivas del día, mediante los Factores Hora Pico (FHP); finalmente se calcula en cada una de ellas, los tiempos de recorrido y velocidades promedio mediante el uso de las Funciones Flujo Demora (Volume Delay Function - VDF). Lo anterior, con el objetivo de caracterizar las emisiones producidas en la malla vial de la ciudad de Bogotá para varios periodos establecidos (hora, día, año) y las 12 categorías vehiculares expuestas en el apartado precedente.

Este inventario se validó a través de la cuantificación de las emisiones de cada contaminante bajo un enfoque Top – Down y con la verificación de emisiones de CO_2 a través de la estimación del consumo de combustible debido a la actividad vehicular.

Para este chequeo, se utilizaron dos tipos de Factores de Emisión. En primer lugar, FE Ponderados de acuerdo con la distribución tecnológica del parque automotor y definidos finalmente a partir de la velocidad promedio general en toda la ciudad. Por otro lado, también se realizó la validación aplicando Factores de Emisión dados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).

Finalmente, con el inventario de emisión establecido para la línea base, se modelaron 22 escenarios distribuidos en 4 vertientes de trabajo principales enfocadas a la modificación de la infraestructura vial, programas de restricción a la circulación vehicular, implementación de tecnología vehicular eléctrica y de bajas emisiones y, por último, planes de chatarrización y renovación de flota.

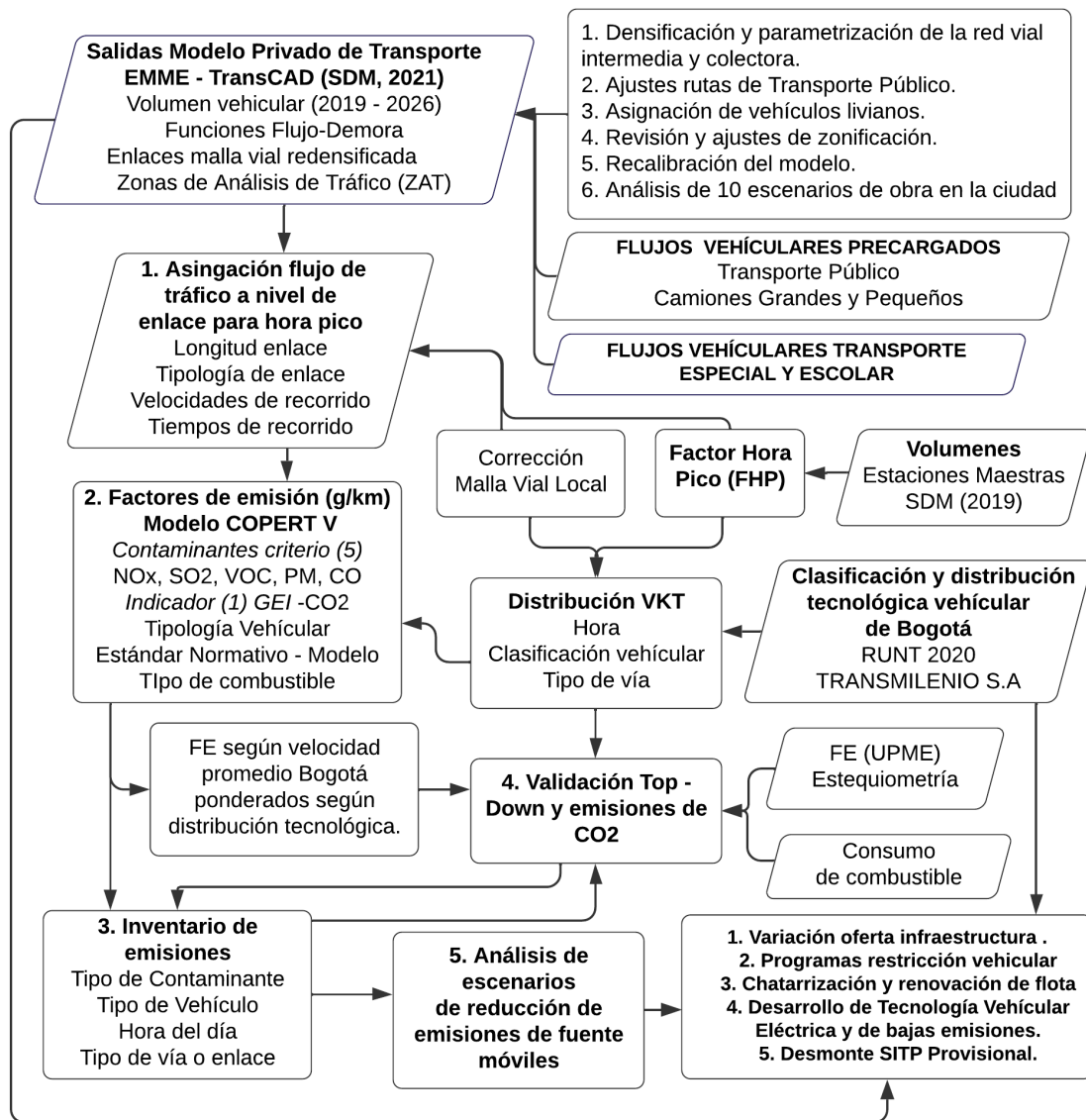
La Figura 1-3 representa el flujograma del proceso planteado para el estudio descrito. Este diagrama permite evidenciar la necesidad de datos extensos en cada una de las etapas para obtener como producto un inventario de emisiones bajo la aplicación de una metodología Bottom – Up, relacionado con el tráfico de la ciudad.

El modelo para la estimación requiere la base de la red vial urbana, densificada en sus enlaces intermedios y colectores, respecto al modelo de transporte utilizado en el 2015. Esta malla vial, debe ser corregida en su componente local, debido a que el modelo de macro modelación representa estos enlaces únicamente a través de conectores entre la malla vial modelada y el centroide de concentración de viajes generados y atraídos en cada una de las Zonas de Análisis de Tráfico (ZAT) contempladas. De igual forma, se actualizaron las matrices de demanda de transporte integradas y basadas en la Encuesta de Movilidad del

año 2019, así como, los recorridos de las rutas de transporte público dentro del modelo privado de la ciudad.

Paralelamente, se requieren datos de actividad vehicular confiables, patrones de flujo calibrados, ajustes de zonificación y accesibilidad, características de la tipología y distribución tecnológica de la flota vehicular, estos último a partir de los datos del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) y de información proporcionada por Transmilenio S.A, como se expresó con anterioridad.

Figura 1-3. Flujograma de metodología de trabajo de investigación.

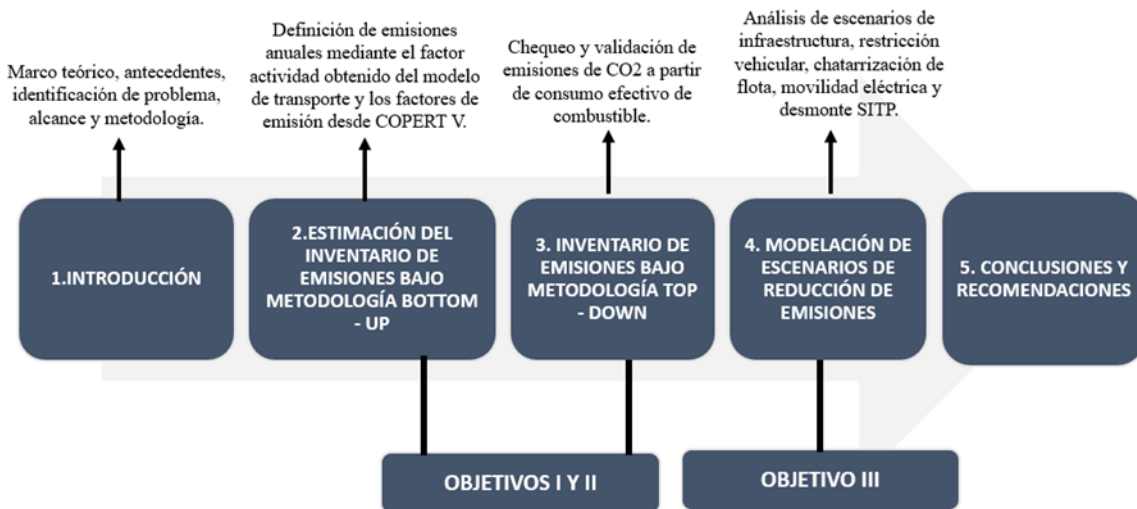


Fuente: Elaboración propia.

1.7 Contenido de la investigación.

La Figura 1-4 presenta la estructura de la presente investigación necesaria para lograr los tres objetivos específicos planteados en la sección 1.4 e incluye cinco capítulos: 1. Introducción, 2. Estimación del inventario de emisiones bajo metodología Bottom - Up, 3. Inventario de emisiones bajo metodología Top - Down, 4. Modelación de escenario de reducción de emisiones, 5. Conclusiones y recomendaciones.

Figura 1-4. Diagrama de contenido de la investigación.

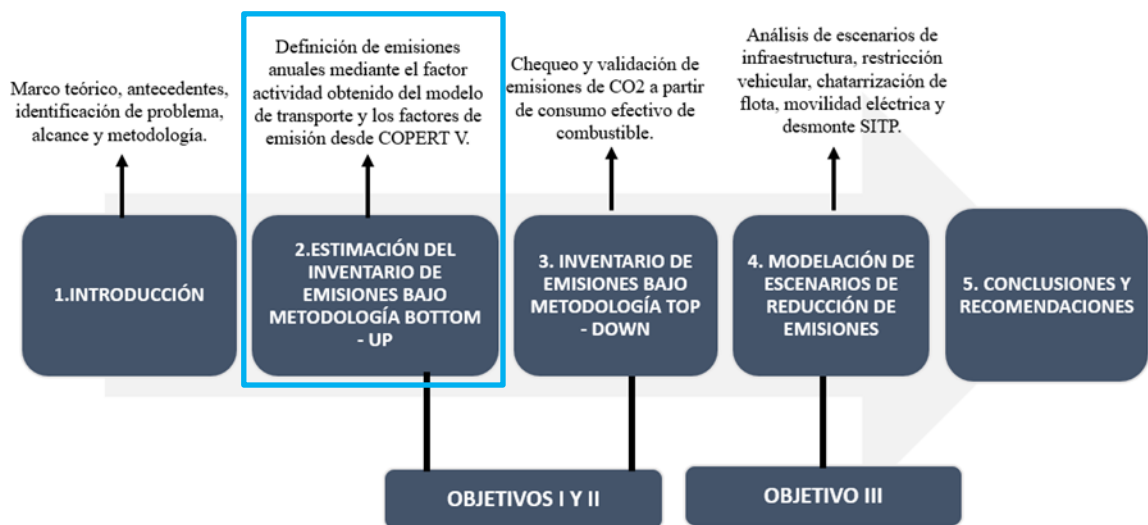


Fuente: Elaboración propia.

2. Estimación del inventario de emisiones bajo metodología Bottom – Up

La estimación del inventario de emisiones bajo la metodología bottom – up, requiere de varios insumos que se exponen y analizan en este apartado. La estructuración de este capítulo da cumplimiento a los dos primeros objetivos específicos de la investigación mediante la acertada definición de los FE y del factor de actividad vehicular (Figura 2-1).

Figura 2-1. Diagrama de contenido de la investigación – Capítulo 2.



Fuente: Elaboración propia.

Las 10 secciones expuestas en esta fracción de la investigación se centran en el análisis y definición de los datos de actividad a nivel enlace vial provenientes de un modelo de transporte para la hora pico (hora de modelación), considerando la variación temporal a partir de información de volúmenes de tráfico monitoreados por la SDM y el uso de funciones VDF para el establecimiento de tiempos de recorrido y velocidades de flujo para 24 horas.

De igual forma, este apartado contempla el establecimiento de la distribución tecnológica para 12 categorías vehiculares a partir de dos bases de datos del parque automotor proporcionadas para Bogotá D.C y la extracción de las funciones de emisión a partir de COPERT V. Finalmente, luego del análisis y definición de estos dos conjuntos de datos se reportan las emisiones totales anuales para los 6 contaminantes considerados y se efectúa un análisis y discusión de los resultados obtenidos.

2.1 Metodología de cálculo del inventario de emisiones enfoque bottom – up.

La metodología de alta resolución para el cálculo del inventario contemplado en el presente estudio se basa en el estudio de Mangones et al. (2019) y se presenta a continuación:

Ecuación 2-1. Método de cálculo del inventario de emisiones Bottom – Up

$$E_{ijhk} = F_{jk} \times l_j \times FHP_{hk} \times FE_{ijk}(v_{jh}) \text{ (Mangones et al., 2019)}$$

Donde:

- h = Hora del día.
- i = Contaminante criterio o GEI (ej. CO , $PM_{2.5}$, NO_x , SO_2 , VOC , CO_2).
- j = Enlace de la malla vial.
- k = Categoría vehicular (ej. taxi, motos, camiones, bus, autos).
- E = Emisiones totales del contaminante i , en la hora h , para cada categoría vehicular k , en el enlace j , [g/h].
- F = Flujo vehicular, [veh/h].
- l = Longitud, [km].
- FHP = Factor Hora Pico para cada hora respecto a la hora de modelación (6:30 – 7:30 pm)
- FE = Factor de emisión, [$gr/veh/km$].
- v = Velocidad promedio a nivel enlace [km/h].

El procesamiento de emisiones se resume de la siguiente forma:

1. Dado un enlace j con longitud l_j , en el cual transita un flujo F de vehículos de cada tipología vehicular k durante una hora del día h , permite la obtención del valor de actividad vehicular (VKT) en dicho enlace al efectuar la multiplicación de estos valores para una hora del día. Lo anterior se representa por medio de la expresión $F_{jk} \times l_j$.
2. Posteriormente, al tener la actividad vehicular para una hora, en este caso, la hora pico o de modelación en dicho enlace j , se debe replicar para cada una de las 24 horas del día mediante la aplicación del FHP que es diferenciado para cada hora del día h y para cada tipología vehicular k . Lo anterior se representa por medio de la expresión $F_{jk} \times l_j \times FHP_{hk}$.
3. Finalmente, para obtener las emisiones se debe multiplicar por el factor de emisión FE , que es propio de cada tipología vehicular k y que está en función de la velocidad promedio v , en cada enlace j . Lo anterior se representa por medio de la expresión $F_{jk} \times l_j \times FHP_{hk} \times FE_{ijk}(v_{jh})$.

Es importante resaltar que para la selección del factor de emisión FE , se tiene internamente una distribución tecnológica que determinará la función a aplicar dentro de cada categoría vehicular k . Es decir, para una misma categoría vehicular se tendrán varios factores de emisión a aplicar.

Por otro lado, la velocidad promedio v que entrará en cada función de emisión será producto de la relación entre la longitud de cada enlace l_j y del tiempo de recorrido promedio, resultante de aplicar los volúmenes replicados ($F_{jk} \times FHP_{hk}$) para cada hora h en cada una de las 45 funciones flujo demora que están diferenciadas según el tipo de vía de la malla vial de la ciudad.

2.2 Modelo Privado de Transporte – Secretaría Distrital de Movilidad (SDM).

Los datos de actividad a nivel de enlace, representados principalmente por parámetros macroscópicos como volúmenes de tráfico, velocidades vehiculares y características

geométricas de la malla vial de la ciudad (como las longitudes de los enlaces asociados), provienen de un modelo de transporte macroscópico estático, que refleja las condiciones de tráfico de Bogotá D.C.

Las salidas del modelo de macro modelación de transporte son producto del Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 celebrado entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá y la SDM que tenía como objeto: *“Generar y analizar nuevos escenarios de modelación de oferta y demanda (macro) a partir de los resultados de la encuesta de movilidad 2019 de la secretaría distrital de movilidad, contemplando la simultaneidad de obras de gran impacto en Bogotá, para obtener alternativas de manejo de tránsito y definir los lineamientos a tener en cuenta en la elaboración de planes de manejos de tránsito (PMT) por parte de los contratistas de obra”*.

Bogotá D.C enfrentará en los próximos años 10 grandes obras de infraestructura que provocarán un gran impacto en las dinámicas de movilidad en la ciudad. La ampliación del sistema troncal y la llegada de obras de infraestructura del transporte ferroviario de pasajeros, con obras como la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB), la troncal de la Avenida Carrera 68 y el tren de cercanías Regiotram de Occidente; representan un desafío en la planeación de estrategias que posibiliten la construcción simultanea de las obras y permitan una gestión adecuada en el impacto del tiempo de viaje de todos los ciudadanos.

Por consiguiente, la ciudad debe contar con herramientas de macromodelación de alternativas de operación durante la ejecución paralela de las obras, que a su vez permitan conducir los lineamientos para el establecimiento de los planes de manejo de tránsito (PMT) necesarios. En concordancia con lo expuesto, el primer objetivo específico del contrato se encaminó a realizar el ajuste, parametrización y re-calibración del modelo de oferta y demanda (macro) en la línea base.

El establecimiento de este macromodelo implicó la simulación de las interacciones entre la demanda y la oferta vial del sistema de transporte de la ciudad mediante la aplicación del

software Emme de INRO Inc. ®. Emme es un completo sistema de modelado de la demanda de viajes para la previsión del transporte urbano, regional y nacional. Se utiliza en más de la mitad de las ciudades más pobladas del mundo y ejecuta algunos de los modelos de pronóstico de transporte más complejos (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021).

De acuerdo con el entregable 3 del Contrato SDM-2020-1903, en este proceso de actualización se tuvo en primer lugar, un trabajo orientado a la densificación y parametrización física de la red vial principal de la ciudad. Este procedimiento se basó en la delimitación de las áreas de influencia de cada proyecto mediante la georreferenciación de los trazados de cada obra.

Más adelante, se realizó una superposición de estas áreas para identificar las zonas de mayor interacción y además definir un área de influencia directa de todos los proyectos en cuestión. A partir de este análisis, se evidenció que la cobertura general de las obras está entre un 75% y un 80% del área de la ciudad (Figura 2-2).

Asimismo, paralelamente se efectuó la densificación de las vías colectoras e intermedias con el fin de complementar la red vial base inicial suministrada por la SDM y contar con una malla fuertemente caracterizada físicamente debido a la importancia en el proceso de recalibración del modelo (Figura 2-3). Esta caracterización física y operacional de los enlaces producto de la densificación contempló parámetros físicos como sentidos de circulación, longitudes, número de carriles y ubicación de la red de semaforización en los arcos adicionados.

Adicionalmente, se llevó a cabo la revisión y ajuste de 917 rutas de Transporte Público debido a la modificación generada por los nuevos enlaces incluidos, garantizando la no afectación de los itinerarios.

Por otro lado, se tuvieron en cuenta restricciones y penalizaciones relacionadas para los giros no permitidos en las principales intersecciones viales. Si bien el nivel de detalle de la infraestructura incluida en el modelo macro no permite la escogencia de desvíos sectorizados (nivel intersección), si se puede establecer penalizaciones en tiempos de recorrido que simulen los itinerarios reales de las rutas.

Tabla 2-1. Resumen de Zonas de Análisis de Tráfico (ZAT).

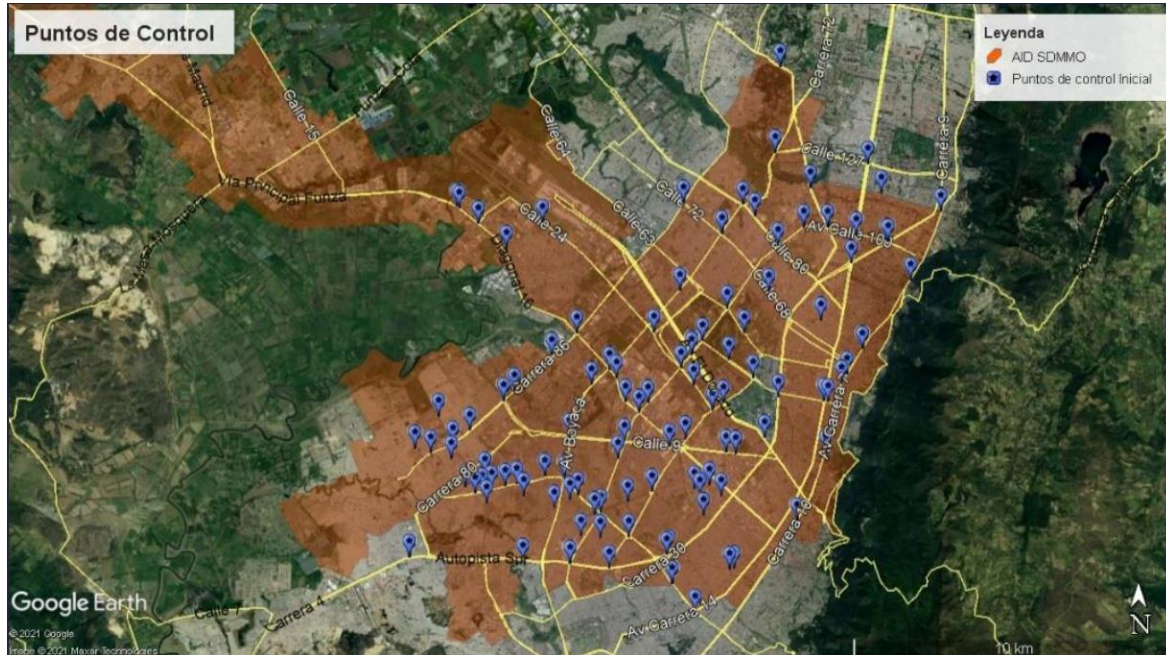
MUNICIPIO	CANTIDAD DE ZAT
Bogotá	922
Bojacá	3
Cajicá	4
Chía	7
Cota	6
El Rosal	2
Facatativá	30
Funza	23
Gachancipá	3
La Calera	7
Madrid	30
Mosquera	35
Sibaté	2
Soacha	32
Sopó	4
Tabio	2
Tenjo	5
Tocancipá	3
Zipaquirá	5
Zonas Externas	16

Fuente: Entregable 3 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (SDM & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

De igual forma, se realiza una revisión en la zonificación de análisis de transporte basada en las proyecciones de crecimiento, la malla vial, la conectividad, accesibilidad e interacción con proyectos futuros. En la Tabla 2-1 se exponen un total de 1,141 ZAT distribuidas para la región metropolitana de Bogotá D.C.

Estas zonas experimentaron una revisión y ajuste de la conectividad mediante el análisis y corrección de la relación conector – centroide, a través de la creación y/o eliminación de conectores con el propósito de representar adecuadamente los accesos y salidas de las ZAT.

Figura 2-4. Puntos de control para volúmenes vehiculares.



Fuente: Entregable 3 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

Por último, respecto a la re-calibración de los volúmenes vehiculares de control se utilizó la información de 29 nodos obtenidos a partir del Contrato de monitoreo SDM-1866-2019, donde 18 de ellos estaban dentro del área de influencia. Además, se usaron datos de entre 35 y 40 puntos de aforo provenientes de la obra de la troncal de Transmilenio de la Avenida Carrera 68. También, se contempló la información de diversos puntos de aforo de los 100 puntos asociados al proyecto de la PLMB. Finalmente, para el proceso de recalibración se utilizaron aproximadamente más de 90 puntos de aforo.

2.2.1 Información extraída del modelo de transporte.

En concordancia con lo anterior, las características principales del modelo se exponen en la Tabla 2-2. Por otro lado, la información que fue extraída a nivel enlace y utilizada para la estructuración del inventario de emisiones de fuentes móviles de Bogotá se expone en la Tabla 2-3.

Tabla 2-2. Características del modelo de tráfico para Bogotá en el año 2019.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Área de estudio	Bogotá
Numero de Zonas de Análisis de Tráfico	1,141
Número de nodos modelados	7,342
Número de enlaces viales modelados	20,107
Número de enlaces viales utilizados o efectivos	18,606
Año base de modelación	2019
Periodo modelado	6:30 - 7:30
Funciones VDF	45
Volumen para categorías vehiculares	12. Vehículos privados (automóviles, camionetas y camperos), taxis, motos, camiones grandes, camiones pequeños, transporte intermunicipal, transporte especial, transporte escolar, SITP provisional, SITP implementado, componente alimentador, componente BRT (bus padrón, articulados y biarticulados)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-3. Información extraída del modelo de tráfico para Bogotá en el año 2019.

INFORMACIÓN	UNIDADES
Nodo inicial y final del Arco	Adimensional
Número de Carriles	Adimensional
Longitud de enlace	km
Tipo de Vía	Arterial, intermedia, local y troncal
Tiempo de recorrido en el arco	minutos
Tiempo real con tiempos en intersecciones	minutos
Velocidad a flujo libre asignada a los corredores	km/h
Velocidad del proceso de asignación y calibración	km/h
Velocidad de recorrido de Transporte Público	km/h
Capacidad del carril por hora	Vehículos/hora
Capacidad total por sentido/Hora	Vehículos/hora

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Red vial

Inicialmente la información recibida estaba distribuida en 20,107 enlaces que fueron depurados para obtener los arcos (18,606) con flujos vehiculares motorizados específicamente, es decir, se eliminó la información relacionada con otros modos de transporte como la bicicleta y la caminata.

La malla vial se encontró categorizada en los siguientes tipos: arterial, intermedia, local y troncal (servicio BRT). Las calles locales donde se realiza la actividad vehicular intrazonal no forman parte de la red del modelo de tráfico macroscópico. Sin embargo, los flujos vehiculares en los conectores desde y hacia los centroides en cada ZAT dan cuenta de la demanda que circularía por estas vías. Por lo anterior, para la estimación de los kilómetros recorridos por vehículo (VKT) en las calles locales, se necesita asociar a cada conector la longitud real de vías locales dentro de la ZAT representada por cada conector del modelo. Este proceso se explica en la siguiente sección.

2.3.1 Corrección malla vial local

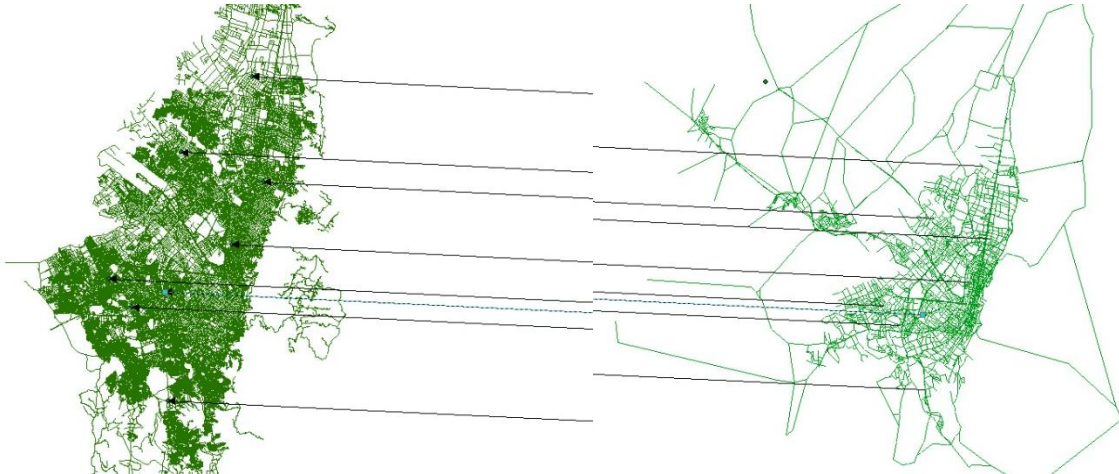
En primera instancia, para realizar la corrección de la malla vial local fue necesario aplicar un proceso de georreferenciación al archivo proporcionado por la SDM, que contenía asociadas las salidas del modelo privado de transporte; debido a que estaba desfasado respecto a la malla vial integral de la ciudad porque no tenía anidado un sistema de coordenadas. Por lo tanto, haciendo uso de la herramienta “*Define projection*” de ArcGIS, se define el Sistema de Coordenadas Geográficas “GCS_WGS_1984”.

Para ajustar la capa proyectada, fue necesario hacer uso de la capa vectorial georreferenciada Malla Vial Integral de Bogotá, obtenida a partir de Datos Abiertos Bogotá para el mes de junio del 2021 y la cual es producto del trabajo de la SDM, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD). Está

información de la red vial estaba categorizada según el tipo de clasificación de la sección vial para el Plan de Ordenamiento Territorial (POT)².

Partiendo de esta información y a través de puntos de referencia distribuidos en diferentes zonas del área de estudio, con la herramienta “*Spatial Adjustment*” se ajustó espacialmente la capa proyectada, con un error residual RMS= 0.000041 (Error Cuadrático Medio). En la Figura 2-5, se puede observar en el costado derecho la malla vial integral y los puntos seleccionados para la georreferenciación y, por otro lado, la malla vial del modelo privado de transporte.

Figura 2-5. Georreferenciación de malla vial del modelo privado de transporte.



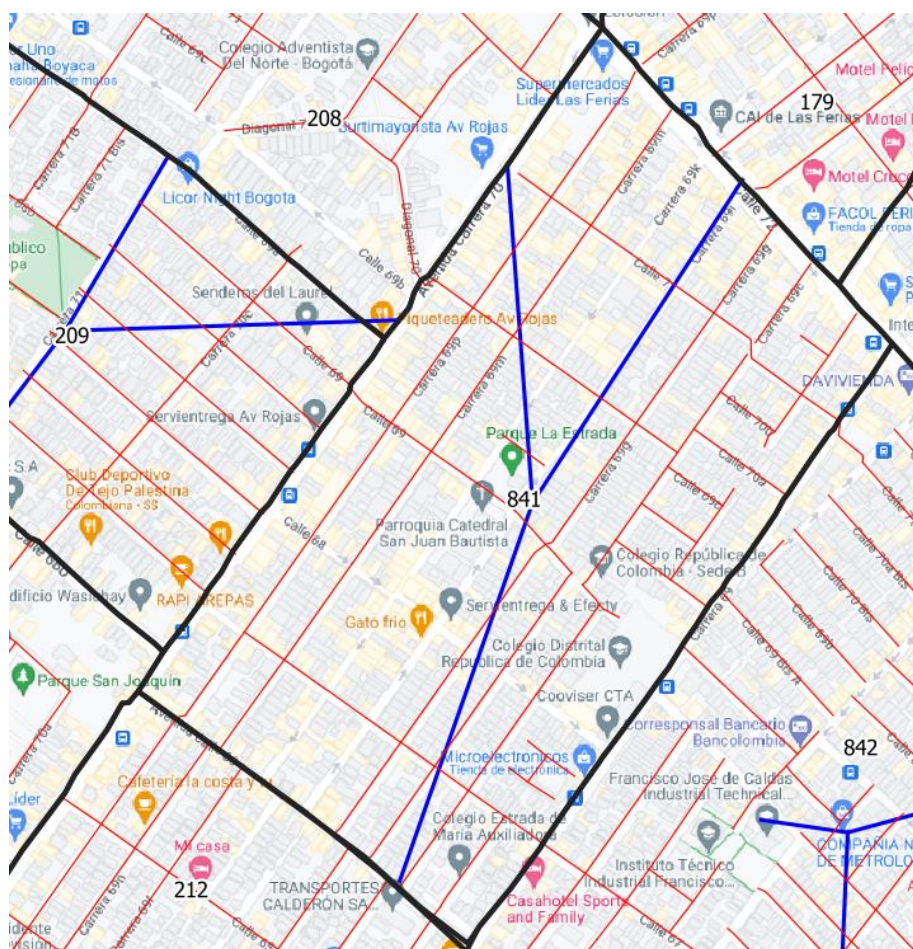
Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

Posterior a la georreferenciación, se utilizaron los archivos geográficos de las Zonas de Análisis de Tráfico y de la malla vial integral de la ciudad, que representa la red local para calcular la distancia de viaje promedio en cada zona. Esta estimación se definió como la suma total de kilómetros de la red local dividida por la cantidad de conectores relacionados con el centroide de dicha área.

² Decreto 190 de 2004, por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 200.

Este proceso se efectuó en primer lugar mediante la asignación de la longitud total de red local a cada ZAT. Lo anterior se llevó a cabo con el uso de la herramienta de gestión de datos “Unir atributos por localización” de QGIS, específicamente el proceso de intersección con mayor superposición entre la capa de polígonos de cada una de las ZAT y la malla vial integral de Bogotá. Por ejemplo, tomando como referencia la ZAT 841 (Figura 2-6), se tiene una longitud total de 6.1 km de malla local y 3 conectores bidireccionales, por lo que cada enlace del modelo que representa la malla vial local de esta zona tendrá una longitud aproximada de 1.02 km.

Figura 2-6. Corrección de malla vial local.

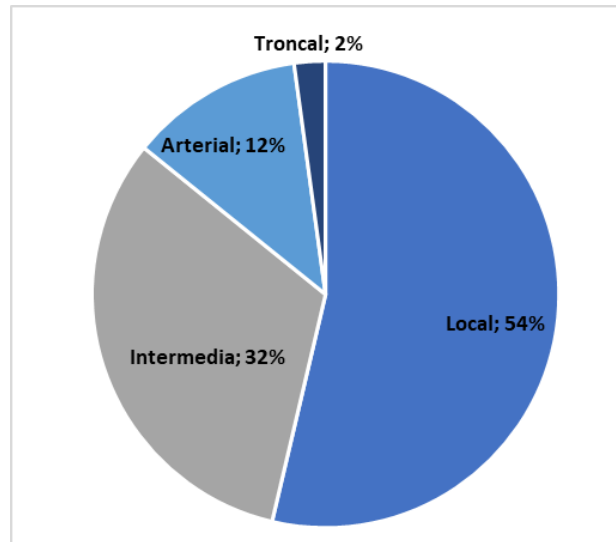


Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.

2.3.2 Malla vial definitiva

Con la corrección de la malla vial local establecida, se definió la longitud total de la red para tener en cuenta la estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles de Bogotá. Los 10,978 km de vías están distribuidos como se expone a continuación:

Figura 2-7. Distribución porcentual de tipo de vía para inventario base.



Fuente: Elaboración propia

En relación con el estudio de Mangones (2017) se tiene un incremento de 24% en la longitud de la malla vial total de la ciudad, lo que quiere decir que se aumentó en un 24% la resolución espacial de las emisiones con respecto al inventario anterior. Por último, de acuerdo con el archivo geográfico proporcionado por Datos Abiertos Bogotá, la longitud de la malla vial de la ciudad es alrededor de 9,393 km. La diferencia respecto a la longitud contemplada en el presente estudio (16.8%), corresponde a los kilómetros de red adicionales que se tuvieron en cuenta relacionados con los 17 municipios aledaños a Bogotá y que representan los viajes relacionados con la capital.

2.4 Factores Hora Pico (FHP)

Se consideró la variación temporal del tráfico para estimar las emisiones de fuentes móviles en la vía a nivel de enlace, desagregadas temporalmente durante las 24 horas. La SDM

proporcionó volúmenes de tráfico monitoreados y registrados durante el año 2019, en 10 estaciones maestras distribuidas en la malla vial urbana (Figura 2-8). Esta información está detallada a intervalos de 15 minutos durante 24 horas para día hábil.

Usando estos datos, se calcularon Factores Hora Pico (FHP_{hk}), definidos como la relación entre los volúmenes de tráfico en cada hora (h) por tipo de vehículo (k) en relación con el tráfico en la hora pico u hora de modelación (6:30 am a 7:30 am). Para garantizar mayor precisión, se estableció FHP_h diferentes para las 12 tipologías vehiculares (Tabla 2-4).

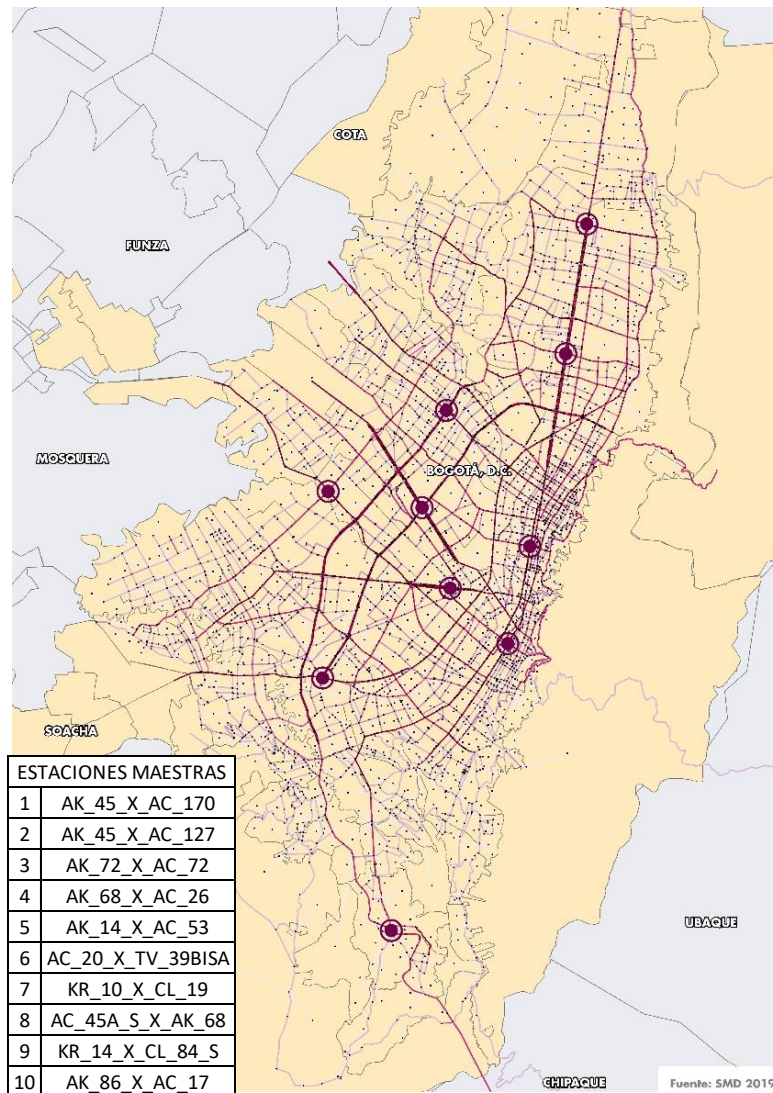
En base a la información de tráfico de un año, Mangones (2017) recomienda un factor de 330 para calcular el tráfico anual a partir de las mediciones de tráfico de 24 horas . Por lo tanto, para el desarrollo de esta investigación también se asumió un factor de 330 para calcular las estimaciones de emisiones anuales.

Tabla 2-4. FHP para cada categoría vehicular.

HORA	AUTOS	CAMIONES GRANDES	CAMIONES PEQUEÑOS	MOTOS	TAXI	ESPECIAL	ESCOLAR	SITP PROVISIONAL	SITP IMPLEMENTADO	ALIMENTADOR	INTERMUNICIPAL	TRANSMILENIO
1	0.13	0.20	0.20	0.13	0.13	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.15	0.17
2	0.12	0.18	0.18	0.12	0.12	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.13	0.15
3	0.12	0.19	0.19	0.12	0.12	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.13	0.16
4	0.20	0.31	0.31	0.20	0.20	0.23	0.23	0.26	0.26	0.26	0.22	0.26
5	0.41	0.63	0.63	0.41	0.41	0.47	0.47	0.52	0.52	0.53	0.45	0.53
6	0.72	1.12	1.12	0.72	0.72	0.83	0.83	0.93	0.93	0.94	0.80	0.94
7	0.96	0.99	0.99	0.96	0.96	1.03	1.03	1.09	1.09	0.97	1.02	0.97
8	1.01	1.05	1.05	1.01	1.01	0.95	0.95	0.89	0.89	1.00	1.14	1.00
9	1.08	1.32	1.32	1.08	1.08	0.96	0.96	0.84	0.84	0.97	0.78	0.97
10	1.17	1.36	1.36	1.17	1.17	0.95	0.95	0.74	0.74	1.03	0.75	1.03
11	1.11	1.75	1.75	1.11	1.11	0.89	0.89	0.66	0.66	0.79	0.82	0.79
12	1.09	1.71	1.71	1.09	1.09	0.88	0.88	0.66	0.66	0.71	1.09	0.71
13	1.10	1.60	1.60	1.10	1.10	0.90	0.90	0.69	0.69	0.72	0.92	0.72
14	1.13	1.51	1.51	1.13	1.13	0.93	0.93	0.72	0.72	0.69	1.41	0.69
15	1.11	1.57	1.57	1.11	1.11	0.94	0.94	0.78	0.78	0.72	1.01	0.72
16	0.97	1.68	1.68	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.75	1.22	0.75
17	1.01	1.50	1.50	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	0.81	0.98	0.81
18	1.10	1.16	1.16	1.10	1.10	0.99	0.99	0.88	0.88	0.89	0.91	0.89
19	1.01	0.87	0.87	1.01	1.01	0.92	0.92	0.83	0.83	0.89	0.73	0.89
20	1.06	0.80	0.80	1.06	1.06	0.87	0.87	0.69	0.69	1.00	0.82	1.00
21	1.03	0.66	0.66	1.03	1.03	0.83	0.83	0.62	0.62	0.98	0.50	0.98
22	0.77	0.42	0.42	0.77	0.77	0.62	0.62	0.47	0.47	0.95	0.32	0.95
23	0.58	0.33	0.33	0.58	0.58	0.49	0.49	0.40	0.40	0.68	0.23	0.68
24	0.52	0.30	0.30	0.52	0.52	0.44	0.44	0.36	0.36	0.61	0.21	0.61

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-8. Categorización de la malla vial de la ciudad en el modelo de transporte y localización de estaciones maestras para estimación de emisiones.



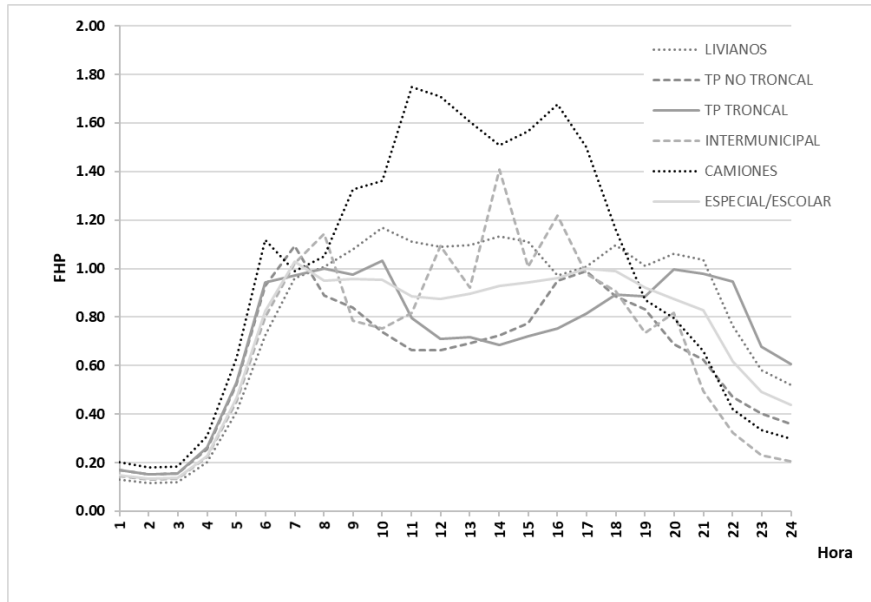
Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

Por último, para propósitos de modelado, se usó la media de la distribución de los *FHP* para las 10 intersecciones en cada categoría vehicular y de esta manera representar el índice de tráfico por hora en la ciudad para cada tipo de vehículo (Figura 2-9).

Adicionalmente, se compararon los *FHP* para cada categoría vehicular con el estudio de Mangones (2017), obteniendo únicamente diferencias significativas para las motocicletas. El comportamiento del flujo a lo largo del día para este tipo de vehículo difiere para el presente estudio, puesto que Mangones (2017) evidencia dos picos horarios de flujo a lo

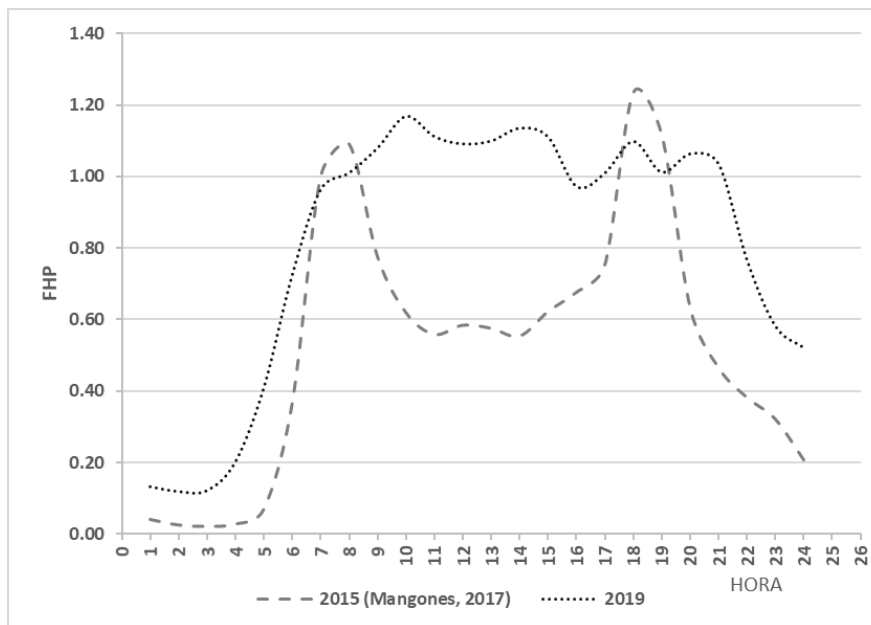
largo del día y el presente estudio muestra un flujo mayor en el día sin periodos valle intermedios. La totalidad de las comparaciones se pueden evidenciar en el Anexo A.

Figura 2-9. Variación diaria del Factor Hora Pico según categoría vehicular.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-10. Comparación FHP motocicletas respecto a Mangones (2017).



Fuente: Elaboración propia.

2.5 Actividad vehicular - VKT

La actividad vehicular resultante del modelo al realizar el producto de la longitud de la malla vial y los flujos para 24 horas es de 103'493,374 de VKT (kilómetros recorridos en un día por la totalidad de los vehículos en la ciudad). La distribución del factor actividad según categoría vehicular y tipo de vía se presenta en la Tabla 2-5 y en la Figura 2-11, respectivamente.

Tabla 2-5. Actividad vehicular para inventario base según categoría vehicular.

ACTIVIDAD VEHICULAR				
Categoría vehicular	$\frac{VKT}{\text{día}}$	Número de Vehículos	$\frac{km}{veh - \text{día}}$	$\frac{km}{veh - \text{año}}$
Autos	58,654,879	1,080,133 ³	54	17,920
C. Grandes	603,216	3,574	169	55,697
C. Pequeños	4,726,534	21,636	218	72,091
Motos	27,596,564	477,340	58	19,078
Taxis	6,479,155	32,962	197	64,866
SITP	930,944	6,346	147	48,410
Alimentador	168,078	693	243	80,037
Transmilenio	519,027	2,085	249	82,148
Buses no SITP	2,942,957	31,362	94	30,967

Fuente: Elaboración propia.

Es importante resaltar que los valores resaltados de kilómetros recorridos al año por los camiones grandes son una estimación con alto grado de incertidumbre, debido a que no se tiene certeza total del lugar de matrícula de los vehículos que pasan por la ciudad, pero se asumen que obedecen a aquellos camiones registrados en Bogotá. Por otro lado, la Tabla 2-6 permite evidenciar que a pesar de que la malla vial arterial corresponde, en longitud, tan solo al 12% de la red total de Bogotá, es en ella donde se desarrolla alrededor del 50% de la actividad vehicular. En contraste, la malla vial local (54% en longitud) refleja alrededor del 22% de los kilómetros recorridos al día en la ciudad.

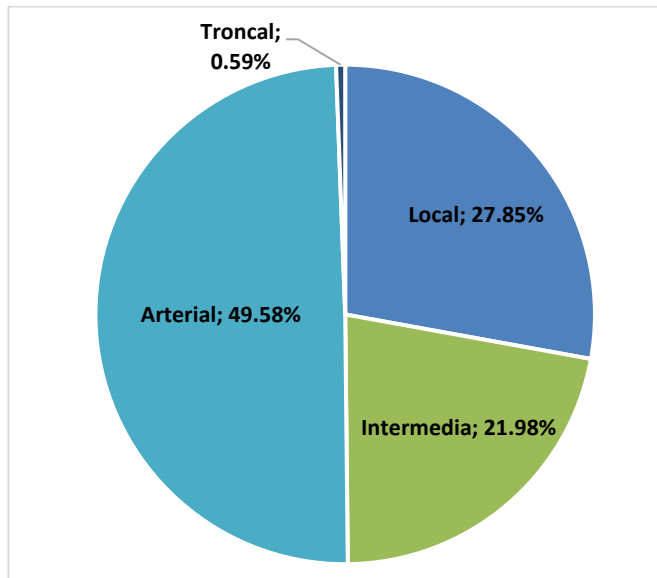
³ Se asumió el 50% de los vehículos particulares debido al Programa de Pico y Placa vigente para la ciudad.

Tabla 2-6. Comparación entre distribución porcentual tipología vial y actividad vehicular.

Tipo de vía	Longitud (km)	%	VKT/día	%
Local	5,893	54%	28,909,974	27.85%
Intermedia	3,527	32%	22,373,170	21.98%
Arterial	1,320	12%	51,711,458	49.58%
Troncal	238	2%	498,773	0.59%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-11. Distribución porcentual de actividad vehicular en malla vial de Bogotá.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2-7 y Figura 2-12, se puede evidenciar la comparación con la actividad vehicular del estudio de Mangones (2017). Se presentan reducciones en los VKT-día de los taxis (38%) para el presente estudio. Por otro lado, se observa una reducción del 17% en la actividad de los buses de transporte público, lo que se puede deber al proceso de desmonte del SITP Provisional y la migración de usuarios a otros modos de transporte como el automóvil y la motocicleta por la insatisfacción del servicio, lo que concuerda con la reducción del porcentaje de satisfacción de los ciudadanos para el SITP entre 2016 (32%) y

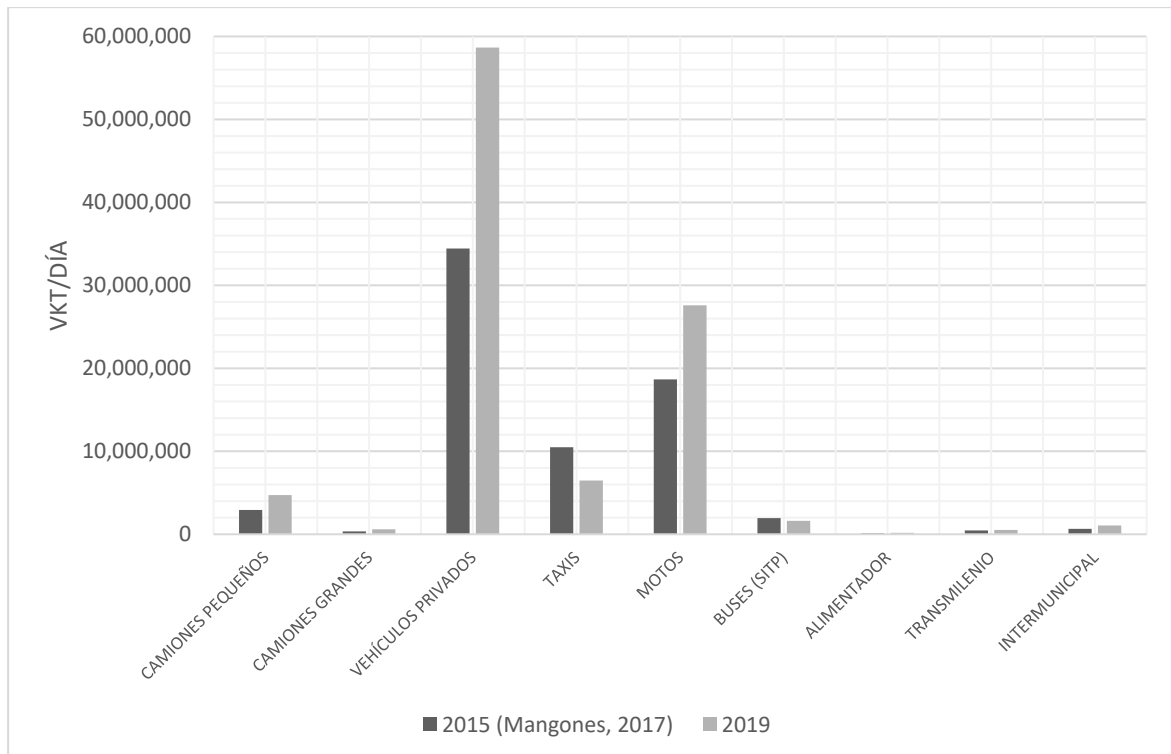
2019 (24%) y, el aumento de satisfacción del vehículo particular de 65% a 83% (Bogotá Cómo Vamos, 2019).

Tabla 2-7. Comparación actividad vehicular estudio Mangones (2017).

<i>Categoría</i>	<i>Año 2015 (Mangones, 2017)</i>	<i>Año 2019</i>	<i>Diferencia %</i>
Camiones pequeños	2,931,105	4,726,534	61%
Camiones grandes	354,749	603,216	70%
Vehículos privados	34,450,174	58,654,879	70%
Taxis	10,487,499	6,479,155	-38%
Motos	18,666,255	27,596,564	48%
Buses (SITP)	1,954,797	1,621,301	-17%
Alimentador	107,214	168,078	57%
Transmilenio	462,428	519,027	12%
Intermunicipal	655,485	1,055,323	61%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-12. Comparación actividad vehicular estudio Mangones (2017).



Fuente: Elaboración propia.

2.6 Velocidades

Es indispensable para esta metodología el uso de las funciones de volumen-demora (Volume Delay Function – VDF) para el cálculo de las velocidades necesarias en la estimación de los factores de emisión. Estas funciones son elementos cruciales en la modelación de las asignaciones de flujos vehiculares a la red vial. Generalmente están calibradas para condiciones específicas de vía y estiman tiempos de recorrido en función de variables como: la longitud del tramo, volumen de autos, velocidades a flujo libre, capacidades viales y volúmenes equivalentes de buses y camiones.

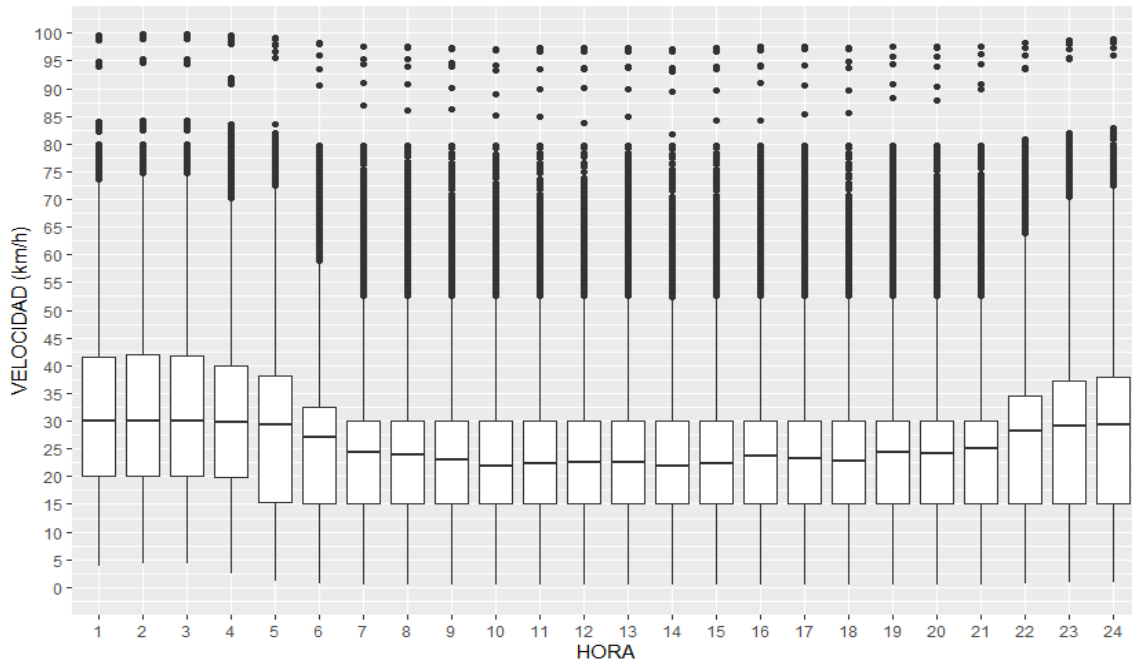
A partir de los tiempos de recorrido obtenidos al introducir los volúmenes vehiculares replicados a las 24 horas mediante los Factores Hora Pico (FHP) expuestos en la sección 2.3; es posible establecer las velocidades de flujo diferenciadas (una para cada hora del día) en los periodos no modelados mediante la relación directa con la longitud de cada uno de los 18,606 enlaces.

En general la distribución de velocidades resultantes de la proyección de volúmenes por medio de los FHP y el uso de las 45 funciones flujo demora (VDF) para Bogotá, muestra un promedio entre 23.2 km/h y 33.6 km/h en la operación de la red para las 24 horas en la ciudad.

Las velocidades mayores a 30km/h solo representan aproximadamente el 27% de las iteraciones de velocidad realizadas internamente en el modelo (Figura 2-14). El 63% de las 446,544 iteraciones contemplaban velocidades hasta los 30 km/h y las velocidades reportadas por encima de los límites de velocidad tan solo representan el 4.6% de las velocidades replicadas.

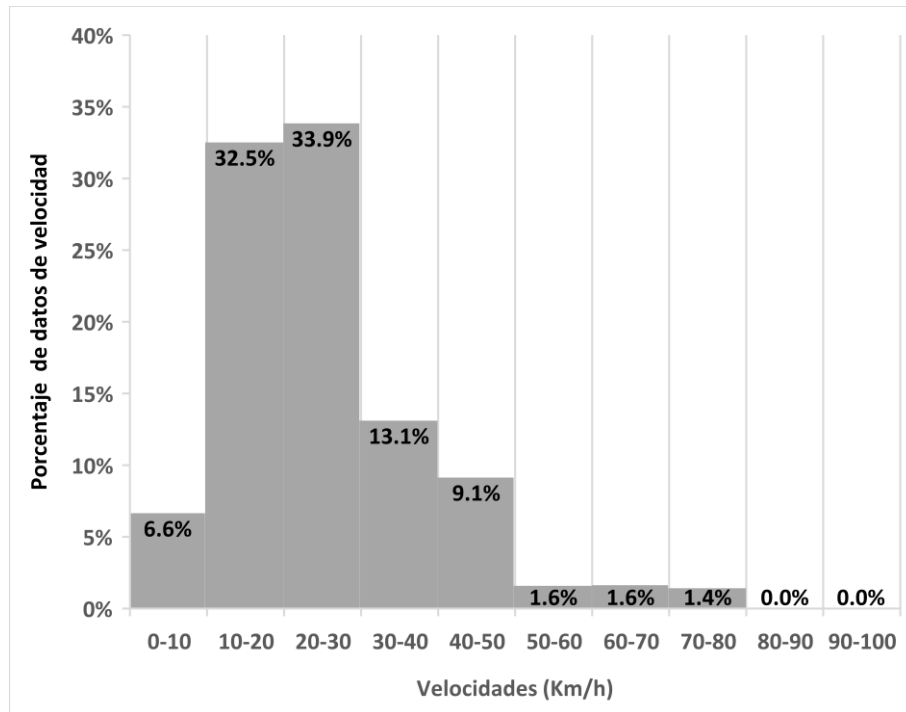
Esta situación es similar a las características de la velocidad del tránsito en Bogotá D.C, como se puede evidenciar en el visor de PowerBI de la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) que contiene parámetros de operación de los corredores principales de la ciudad y donde se evidencia una velocidad promedio cercana a los 32 km/h como se observa en la Figura 2-15.

Figura 2-13. Distribución de velocidad a lo largo del día.



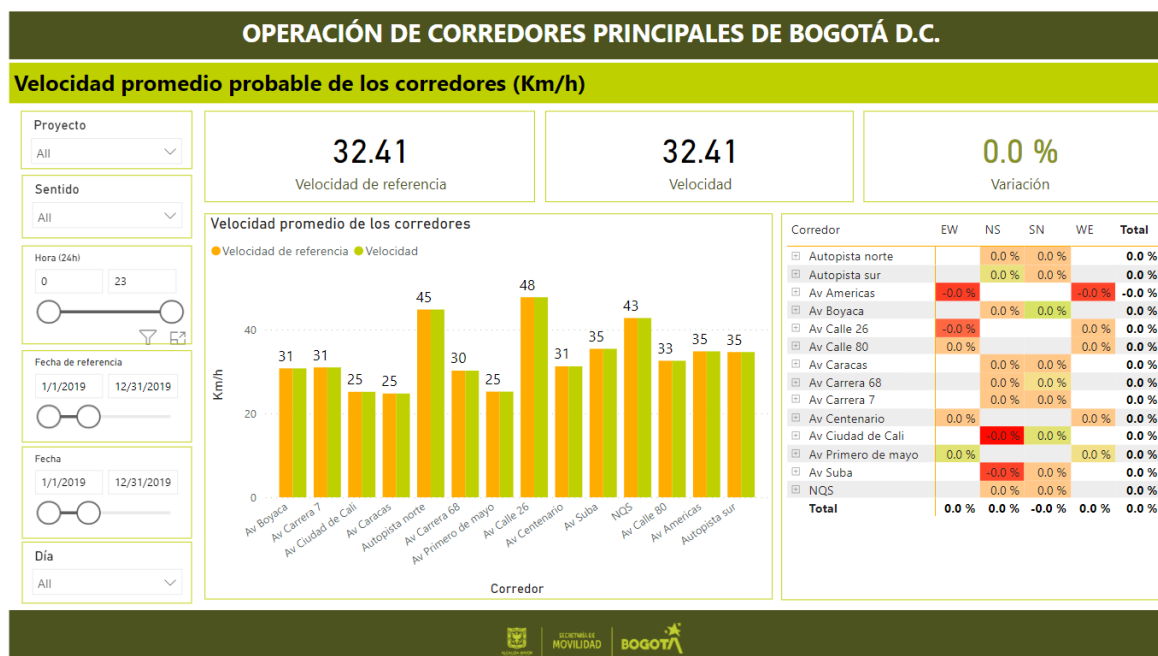
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-14. Histograma de velocidades.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-15. Información de velocidades contenidas en el visor de PowerBI.



Fuente: Elaboración propia.

2.7 Parque automotor

El análisis del parque automotor y de la flota vehicular de la ciudad se basó en dos fuentes principales de información. La primera contempla el registro vehicular nacional actualizado a marzo del 2020 por parte del RUNT y la segunda de ellas consistió en el registro de la flota del SITP compuesta por vehículos del componente zonal implementado, componente alimentador y componente troncal (buses articulados, buses biarticulados y buses padrones) proporcionada para este estudio por la empresa Transmilenio S.A.

- **Información proporcionada por el RUNT.**

Se recibieron 29 bases de datos con la información de las siguientes categorías vehiculares: autos, bus, buseta, camión, camioneta, campero, ciclomotor, cuadriciclo, cuatrimoto, microbús, motocarro, motocicletas, mototriciclo, tractocamión y volqueta. Sin embargo, en concordancia con los flujos vehiculares proporcionados por el modelo privado de transporte,

se omitió la información en el presente análisis de las siguientes categorías: ciclomotor, cuadríciclo, cuatrimoto, motocarro y mototriciclo.

De igual forma, los datos a nivel nacional se filtraron para los vehículos registrados en Bogotá D.C y 12 municipios de su área metropolitana. Dentro de la base del RUNT no se encontró información disponible de 7 municipios aledaños a Bogotá, como Bojacá, Gachancipá, Sopó, Tabio, Tenjo y Tocancipá, por lo cual, la distribución del parque automotor para la estructuración del inventario no obedece a la distribución tecnológica de los vehículos en estos municipios.

Es necesario contemplar la totalidad del parque automotor en la región metropolitana por tres razones fundamentales:

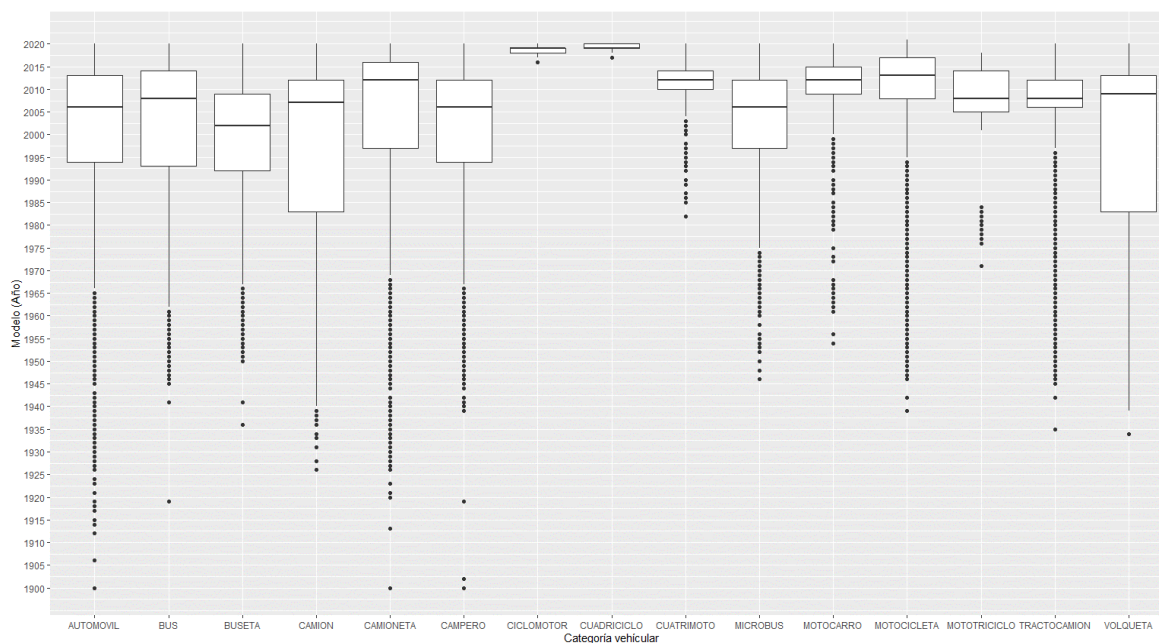
1. La encuesta de movilidad del año 2019 proporcionó la información base de los patrones y características de viaje para la calibración del modelo privado de transporte de Bogotá. La encuesta contemplo en su estructuración a estos 12 municipios, mediante el 19.6% de las encuestas realizadas y 219 ZAT (Tabla 2-1).
2. Para tener precisión en la distribución tecnológica real del parque automotor que circula en la malla vial de la ciudad, es importante reconocer que no solo se presenta actividad de vehículos matriculados en Bogotá, sino también de municipios aledaños. Contemplar únicamente a los vehículos matriculados en la ciudad no reflejaría realmente las emisiones producidas en la ciudad.
3. En conformidad con la Ley orgánica 2199 del 8 de febrero de 2022⁴, es importante en términos de transporte comprender las fuertes dinámicas de movilidad cotidiana debido

⁴ Por medio de la cual se desarrolla el Artículo 325 de la constitución política y se expide el régimen especial de la Región Metropolitana Bogotá – Cundinamarca.

a los motivos de viajes y la configuración del territorio entre Bogotá y sus municipios vecinos; 2.65 millones de viajes efectivos.

La limpieza de la base de datos consistió en identificar los datos atípicos con base en el año modelo de los vehículos para cada tipología vehicular, eliminando aquellos que, aunque tienen registro vigente, no ruedan regularmente en las vías. Lo anterior con el fin de no sobreestimar las emisiones considerando vehículos que, a pesar de estar matriculados, no estén circulando por la malla vial.

Figura 2-16. Identificación de datos atípicos en registros del parque automotor.

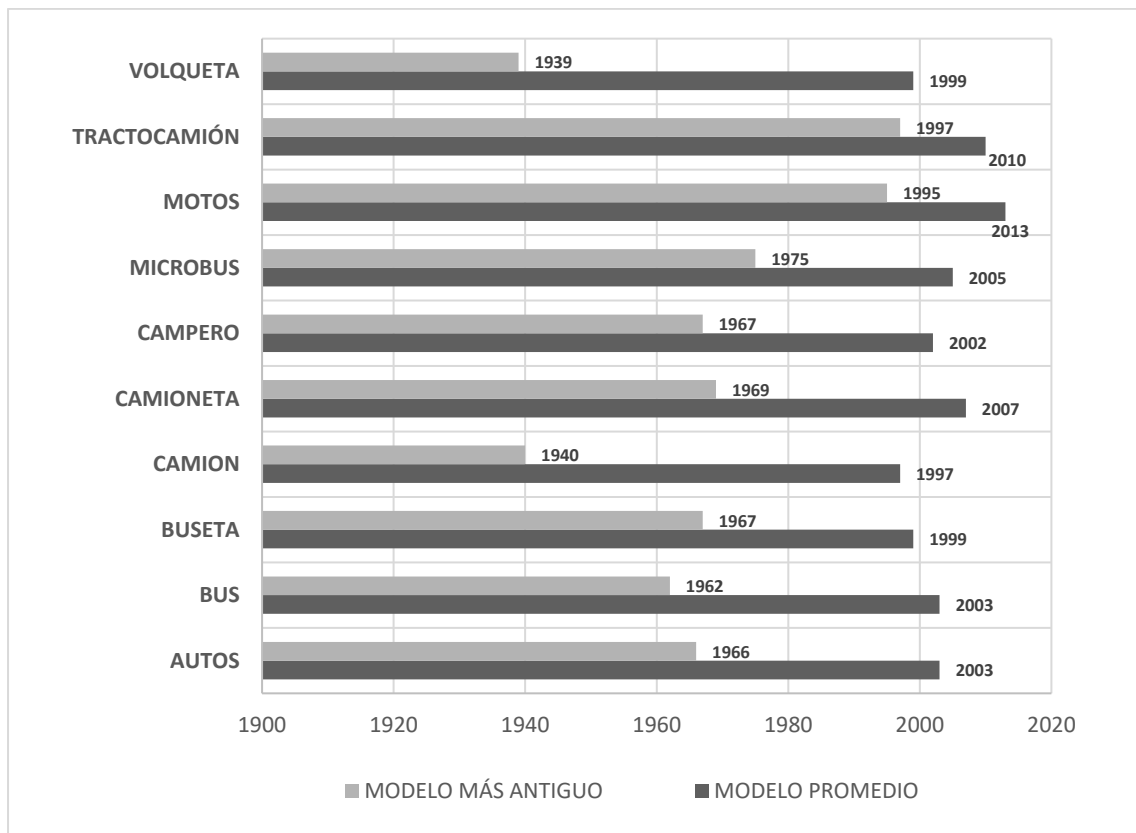


Fuente: Elaboración propia.

Se eliminaron aproximadamente 145,000 datos, es decir, un 3.5% de los datos iniciales para un total de 3'057,302 registros para tener en cuenta (Figura 2-16). En la Figura 2-17 se observa que la edad promedio de los vehículos particulares es de aproximadamente 17 años, las motocicletas 25 años, camiones y tractocamiones 23 años, volquetas 21 años y buses pertenecientes a transporte de pasajeros aproximadamente 20 años.

Para esta última categoría se aplicó el Decreto 1079 de 2015⁵, específicamente el Artículo 2.2.1.1.5.6 “*Reposición Vehículos de Transporte Colectivo y Mixto*” que está fundamentado en el Artículo 138 del Decreto 2150 de 1995 basado en el Artículo 6 de la Ley 105 de 1993 establece que la máxima vida útil de vehículos de transporte colectivo y mixto es de 20 años. “*Se aplica a los vehículos destinados al servicio público de transporte colectivo de pasajeros y mixto con radio de operación metropolitano y/o urbano*”

Figura 2-17. Año modelo del parque automotor.



Fuente: Elaboración propia.

- **Parque automotor proporcionado por Transmilenio S.A.**

Por otro lado, se recibió información de la flota vehicular del SITP con datos sobre el modelo, el estándar de emisión, tipología vehicular y tipo de tecnología. Esta información

⁵ Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte.

complementó principalmente los registros del RUNT para el sistema de transporte público de la ciudad.

La data proporcionada por Transmilenio S.A., ente gestor del SITP, contaba con información diferenciada para el componente zonal (6,200 registros), alimentador (917 datos) y troncal (2,358 datos). Es importante resaltar que se omitieron los registros de los vehículos 100% eléctricos, ya que las emisiones en ruta de estos vehículos es cero.

La distribución final de los datos de la flota vehicular tenida en cuenta para estructurar la distribución tecnológica base para establecer el inventario de emisiones, a partir de información del RUNT y de Transmilenio S.A. se presenta a continuación:

Tabla 2-8. Distribución final parque automotor.

Categoría	Cantidad	%
Autos, camperos y camionetas	2,607,226	66.20%
Camiones pequeños	84,271	2.14%
Camiones grandes	36,541	0.93%
Motocicletas	1,085,419	27.56%
Taxi	68,793	1.75%
SITP provisional	46,762	1.19%
SITP implementado	6,232	0.16%
Alimentador	693	0.02%
Transmilenio	2,199	0.06%

Fuente: Elaboración propia.

2.7.1 Clasificación del parque automotor según segmento europeo.

Para la presente investigación se buscó establecer una clasificación lo más desagregada posible con el fin de asociar desde el modelo COPERT V, un factor de emisión que representará mejor la tasa de contaminación de cada categoría vehicular en la ciudad.

Por tanto, a partir de las variables de las dos bases de datos descritas en la sección anterior, se clasificó el parque automotor de acuerdo con el segmento de estándar de emisiones europeo. La tabla con las reglas de clasificación se observa a continuación:

Tabla 2-9. Clasificación del parque automotor de Bogotá según segmento europeo.

Type	Segmento	Descripción	Clasificación	BASE DEL RUNT UTILIZADA
Passenger Cars	M1 - Mini Cars	Vehículos utilizados para el transporte de pasajeros y que comprendan no más de 8 sillas además del asiento del conductor.	<=1200 cc	Se utilizo para vehículos particulares (Autos, Camioneta, Campero). Para Taxis se utilizó únicamente la variable de Servicio Público del RUNT.
	M1 -Small Cars		<=1600 cc	
	M1 -Medium Cars		<= 2000 cc	
	M1 - Large Cars		>2000 cc	
Light Commercial Vehicles	N1 <3.5 t	Vehículos utilizados para el transporte mercancías cuyo peso máximo no exceda de 3.5 toneladas.	N1 - I (< 1305 kg)	Camiones
			N1-II (1305 kg - 1760 kg)	
			N1 - III (1760 kg - 3500 kg)	
Heavy Duty Vehicles	N2 (3.5t - 12 t)	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 3.5 toneladas pero sin exceder las 12 toneladas.	N2 - Rigid (3.5 - 7.5 Ton)	Camiones
			N2 - Rigid (7.5 - 12 Ton)	
	N3 (> 12 t) RIGID	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 12 toneladas.	N3 - Rigid (12 - 14 Ton)	Camiones - Volquetas
			N3 - Rigid (14 - 20 Ton)	Camiones - Volquetas
			N3 - Rigid (20 - 26 Ton)	
			N3 - Rigid (26 - 28 Ton)	
			N3 - Rigid (28 - 32 Ton)	
	N3 (> 12 t) ARTICULATED	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 12 toneladas.	N3 - Rigid (> 32 Ton)	Tractocamion
			N3 - Articulated (14 - 20 Ton)	
			N3 - Articulated (20 - 28 Ton)	
N3 - Articulated (28 - 34 Ton)				
Motorcycles	Mopeds	Vehículos de dos ruedas de motor térmico.	L1 y L2 (<= 50 cm3)	Motos
	Motorcycles		L3, L4 y L5 (50 cm3 - 250 cm3)	
	Motorcycles		L3, L4 y L5 (250 cm3 - 750 cm3)	
	Motorcycles		L3, L4 y L5 (> 750 cm3)	
Buses	Urban Buses Midi	Categorías M2 y M3	M2 Y M3 (<- 15t)	Bus, Buseta y Microbus Información Transmilenio
	Urban Buses Estándar		M2 Y M3 (15t - 18t)	Bus - Información Transmilenio
	Urban Buses Articulated		M2 Y M3 (>18t)	Información Transmilenio

Fuente: Elaboración propia.

2.7.2 Clasificación normativa Euro

Después de establecer la base consolidada de la flota vehicular y clasificarla según la Tabla 2-9, es fundamental establecer el criterio de clasificación de los registros para definir la distribución tecnológica, es decir, distribuir los vehículos según el tipo de combustible utilizado y normativa europea de emisiones, ya que de esto depende el factor de emisión

A pesar del esfuerzo del país para producir combustibles más limpios, los programas de política para limitar la entrada de vehículos atrasados tecnológicamente y que generalmente no cumplen con los estándares de emisión manejados en el primer mundo; están desactualizados. En Colombia no se tiene certeza de la distribución tecnológica según estándar europeo de los vehículos que transitan por su red vial.

Por lo anterior, para catalogar cada uno de los registros del parque automotor dentro de un estándar de emisión, se realizó una inspección de la normativa nacional que se ha expedido hasta el año 2019 en términos de regulación del tipo de combustible y la tecnología vehicular exigida. Se consultaron los lineamientos establecidos por la Resolución 005 de 1996⁶, la Resolución 909 de 1996⁷, la Resolución 1048 de 1999⁸, la Resolución 910 de 2008⁹, la Resolución 2604 de 2009¹⁰, la Resolución 1111 de 2013¹¹ y la Ley 1972 de 2019, que

⁶ Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diésel, y se definen los equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones y se adoptan otras disposiciones.

⁷ Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 005 de 1996.

⁸ Por medio de la cual se fijan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diésel, en condición de prueba dinámica, a partir del año modelo 2001

⁹ Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.

¹⁰ Por la cual se determinan los combustibles limpios teniendo como criterio fundamental el contenido de sus componentes, se reglamentan los límites máximos de emisión permisibles en prueba dinámica para los vehículos que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte terrestre de pasajeros y para motocarros que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte terrestre automotor mixto y se adoptan otras disposiciones

¹¹ Por la cual se modifica la Resolución 910 de 2008.

estableció la normativa euro 3 para motocicletas a partir del año 2021. El resumen de este análisis se puede observar en el Anexo B.

De igual forma, se contrastó la clasificación obtenida con la distribución tecnológica del estudio de Guzmán (2014), Rojas (2015), AMVA (2018) y Mangones (2017). En la Tabla 2-10 se puede observar la clasificación para la normativa de estándar europeo de emisiones definida para el presente estudio.

Tabla 2-10. Clasificación normativa europea de emisiones para el estudio.

CATEGORIA	COMBUSTIBLE	<= 1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	> 2019
		AUTOS	Diesel	SIN NORMA															EURO 2			EURO 4									
Gasolina	SIN NORMA					EURO 1										EURO 3			EURO 4												
Gas Natural Vehicular	EURO 1																														
CAMIONES	Diesel	SIN NORMA															EURO 2			EURO 4		EURO 5									
	Gasolina	SIN NORMA					EURO 1										EURO 3														
	GNV - Diesel (Dual)	SIN NORMA					EURO 3			EURO 4		EURO 5			EURO 6																
BUSES	Diesel	SIN NORMA															EURO 2			EURO 4		EURO 5									
	Gasolina	SIN NORMA					EURO 1										EURO 2		EURO 3												
	GNV - Transporte Privado	SIN NORMA															EURO 2			EURO 4											
	GNV - Transporte Público	SIN NORMA															EURO 4														
MOTOS	Gasolina	SIN NORMA															EURO 2														

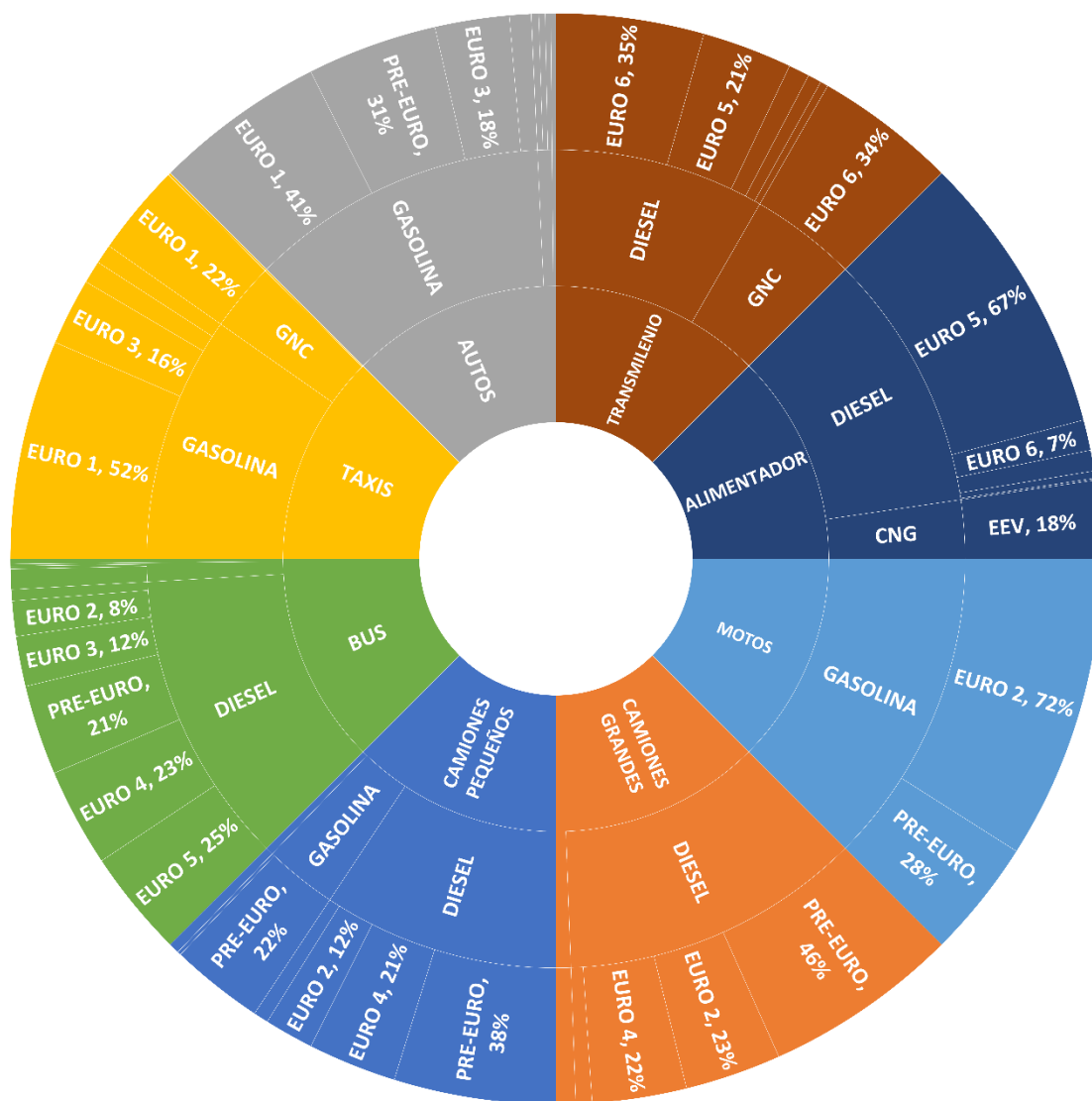
Fuente: Elaboración propia.

Es importante resaltar que esta clasificación solamente fue necesaria aplicarla para la base de datos del RUNT, debido a que la información de Transmilenio S.A definió para cada vehículo de su flota el estándar de emisión. Por otro lado, la Tabla 2-10 está condensada de esta manera debido a que no se contó con información para cada registro de la tipología exacta del motor.

2.7.3 Distribución tecnológica del parque automotor de Bogotá D.C

La distribución tecnológica resultante del parque automotor y que se aplicó en la estructuración del inventario de emisiones se puede consultar en el Anexo B. En la Figura 2-18 se presenta un diagrama de proyección solar con la distribución gráfica obtenida para la flota de Bogotá D.C.

Figura 2-18. Distribución tecnológica principal del parque automotor.



Fuente: Elaboración propia.

2.8 Factores de emisión de COPERT V

Los Factores de Emisión se calcularon a partir de las funciones proporcionadas por el modelo COPERT V (Versión 5.4.36 del 25 de septiembre de 2020), específicamente del Apéndice 4 del capítulo “1.A.3.b.i-iv Transporte por carretera”, de la guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP/EEA 2019.

Con las velocidades obtenidas a partir de los volúmenes del modelo privado de transporte, los FHP y las curvas flujo demora, se calcularon estos factores en ruta y para condiciones de operación en caliente.

La metodología de estimación de emisiones de COPERT V permitió la obtención de las emisiones de escape de CO , CO_2 , SO_2 y COV . Las emisiones de NOx , se componen como NO y NO_2 , es decir, se reportan como NO_2 . Así mismo, las emisiones másicas de PM en los gases de escape de los vehículos caen principalmente en el rango de tamaño de $PM_{2.5}$. Por lo tanto, para esta investigación se hace la suposición de que todos los factores de emisión másicos de PM corresponden a $PM_{2.5}$.

Los factores de emisión en caliente proporcionados por COPERT V dependen de la velocidad y se expresan en g/km . Estos FE están diferenciados por tipo de combustible, la clase de vehículo (segmento europeo) y la tecnología del motor. Es importante resaltar que los contaminantes CO , COV , NOx y $PM_{2.5}$ cuentan con ecuaciones directas de emisión (Ecuación 2-2), mientras que las emisiones cubiertas por CO_2 y SO_2 se calculan indirectamente a partir del consumo de energía (Ecuación 2-2, Ecuación 2-3 y Ecuación 2-4). Los parámetros α , β , γ , δ , ϵ , ζ , η y θ son constantes dadas por el modelo para cada tipo de vehículo y contaminante.

Ecuación 2-2. Ecuación de estructuración de Factor de emisión

$$FC_{k,m} \text{ ó } FE_{i,k,m} = \frac{\alpha * V^2 + \beta * V + \gamma + \frac{\delta}{V}}{\epsilon * V^2 + \zeta * V + \eta} * (1 - \theta) \text{ (EEA, 2021).}$$

Donde:

- i = Contaminante
- k = Tipo de vehículo
- m = Tipo de combustible (gasolina, diésel, gas natural vehicular)
- FE = FE por contaminante i , tipo de vehículo k y tipo de combustible m (g/km).
- FC = Consumo de combustible para tipo de vehículo k y combustible m (MJ/km).
- V = Velocidad promedio de circulación para la categoría vehículo k (km/h).

Ecuación 2-3. Factor de emisión para CO₂

$$EF_{CO_2,k,m} = 44.011 * \frac{FC}{12.011 + 1.008 * r_{H:C,m} + 16 * r_{O:C,m}} \text{ (EEA, 2021).}$$

Ecuación 2-4. Factor de emisión para SO₂

$$EF_{SO_2,k,m} = 2 * K_s * FC \text{ (EEA, 2021).}$$

Donde:

- $r_{H:C,m}$ = Relación hidrógeno-carbono en el combustible.
- $r_{O:C,m}$ = Relación oxígeno-carbono en el combustible.
- K_s = Contenido de azufre en el combustible $[\frac{g \text{ de azufre}}{g \text{ combustible}}]$ ($1 \text{ ppm} \approx \frac{10^{-6} g}{g \text{ comb}}$)

Finalmente, los valores de contenido de azufre, relación hidrógeno – carbono y oxígeno carbono para los combustibles utilizados en la calibración de las ecuaciones de COPERT y en el desarrollo de la presente investigación se presentan a continuación:

Tabla 2-11. Características de combustible asumido para la presente investigación.

Combustible	Valor calorífico (MJ/kg)	rH:C	rO:C	Contenido de azufre (ppm)	Contenido de azufre (g/g comb)
Gasolina E10	43.774	1.98	0.053	270	2.70E-04
Diesel B7	42.695	1.86	0.007	21	2.10E-05
Gas Natural	48	4	0	NA	NA

Estos valores son congruentes con los contenidos límites de azufre establecidos para los combustibles proporcionados a la ciudad. Según Mangones (2017), desde 2010, Bogotá exige la venta de combustible diésel con una concentración de azufre menor a 50 ppm, mientras que el contenido de azufre de la gasolina puede llegar a 300 ppm. Adicionalmente, según el CONPES 384312 de 2018, para los último años Ecopetrol ha venido entregando a grandes urbes combustible diésel de 20 a 25 ppm de azufre, medida que ha tenido un impacto

¹² Política para el mejoramiento de la calidad del aire.

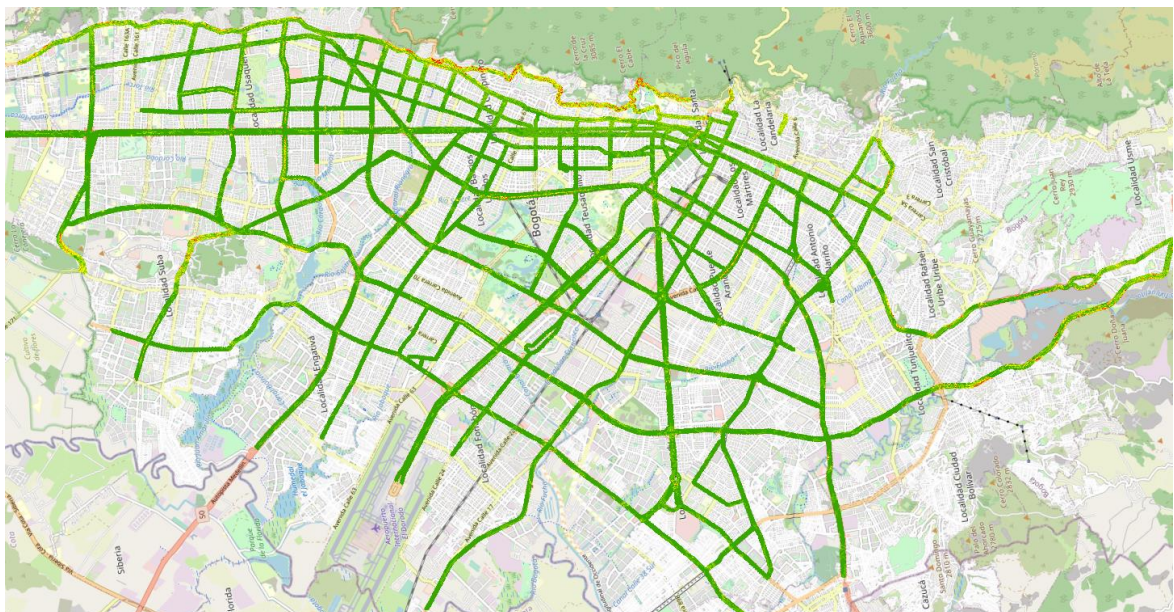
positivo en el combustible distribuido al resto del país cuyo contenido de azufre en promedio es de 26,6 ppm. Así mismo, el documento CONPES prevé que el combustible diésel proporcionado a Bogotá a partir de 2019 para la flota de Transmilenio estaría alrededor de 10 ppm.

2.8.1 Parámetros

Para seleccionar adecuadamente los FE a partir de la amplia gama de ecuaciones proporcionada por COPERT V, es necesario definir las condiciones más aproximadas de Bogotá en términos de operación de tipo de vía, pendiente y porcentaje de carga (camiones y buses).

En primer lugar, se asumió la condición de vías urbanas y condiciones de operación para hora pico del modelo COPERT. De igual forma, para las emisiones debidas al uso del diésel, se asumió un valor del 50% de carga específicamente para los buses y camiones puesto que es un determinante para la selección de FE (al igual que la pendiente). Esta suposición evitaría la sobrestimación o subestimación de la contaminación calculada.

Figura 2-19. Archivo ráster de pendientes para selección de FE.



Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

A través de un archivo ráster de pendientes y elevaciones para los corredores principales de la ciudad y un proceso de ponderación de pendiente por longitud se obtuvo un valor de 1.32% (Figura 2-19), definiendo así un valor de 2% para la selección de los FE en COPERT V. Finalmente, con estos parámetros fue posible definir un total de 295 funciones de emisión para cada contaminante a partir de la base de aproximadamente 29,000 ecuaciones de COPERT; estos factores se pueden consultar en la base de datos publicada por Jaime (2022).

2.9 Resultados Inventario de Emisiones

La Tabla 2-12 presenta el resultado final del inventario de emisiones totalizado. El contaminante emitido en mayor cantidad para la línea base fue el dióxido de carbono componiendo el 95% de la emisión. Sin embargo, entre los contaminantes criterio el monóxido de carbono representa aproximadamente el 81.9% de las emisiones, seguido de los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno con participación en la emisión de 9.1% y 8.5% respectivamente.

Tabla 2-12. Resultados inventario de emisiones Bottom – Up (Ton métricas /año).

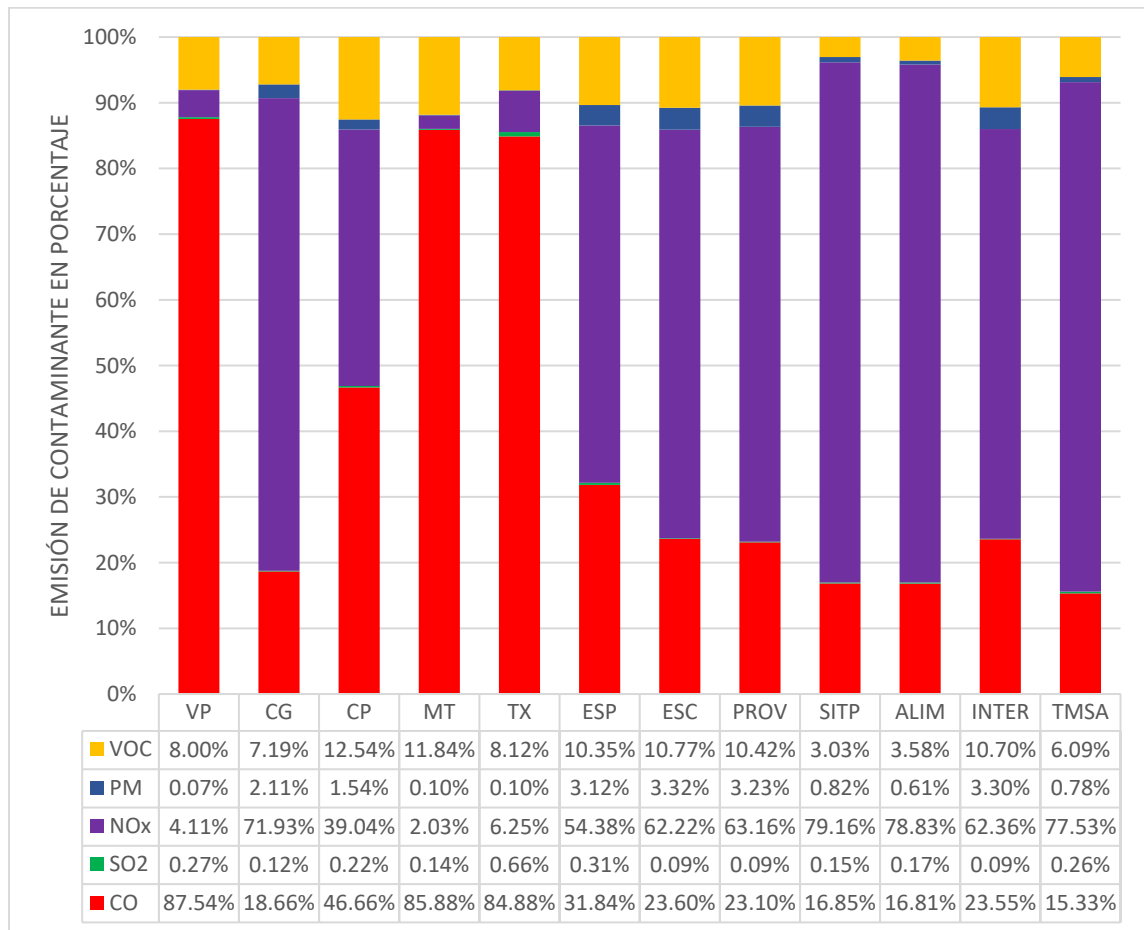
<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>SO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>PM_{2.5}</i>	<i>COV</i>
412,296	9,577,326	1,205	42,713	1,417	45,758

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2-20 se presenta la distribución porcentual de emisión de contaminantes criterio diferenciada para las 12 categorías vehiculares contempladas en el estudio. Se evidencia que los vehículos privados (autos, camionetas y camperos), las motos y los taxis emiten aproximadamente el 85% o más de sus emisiones en términos de monóxido de carbono. Por otro lado, respecto al transporte de carga; los camiones pequeños definidos hasta un peso de 12 toneladas aportan un 46% en *CO* y un 39% en *NO_x*. Para las categorías relacionadas con el transporte especial, transporte escolar y transporte público las emisiones de *NO_x* son mayores al 54% y de *CO* al 16,8%. Los porcentajes de emisión *SO₂*, *COV* y *PM_{2.5}* internos para todas las categorías son reducidos en comparación a los otros contaminantes criterio.

Cabe aclarar, que en general para todas las categorías el mayor contaminante emitido es el CO_2 con 98% o más, a excepción de los vehículos privados con un 94% y las motocicletas con un 89%. Lo anterior sugiere que la mayor cantidad de contaminantes emitidos por los vehículos en Bogotá corresponden a Gases de Efecto Invernadero (GEI).

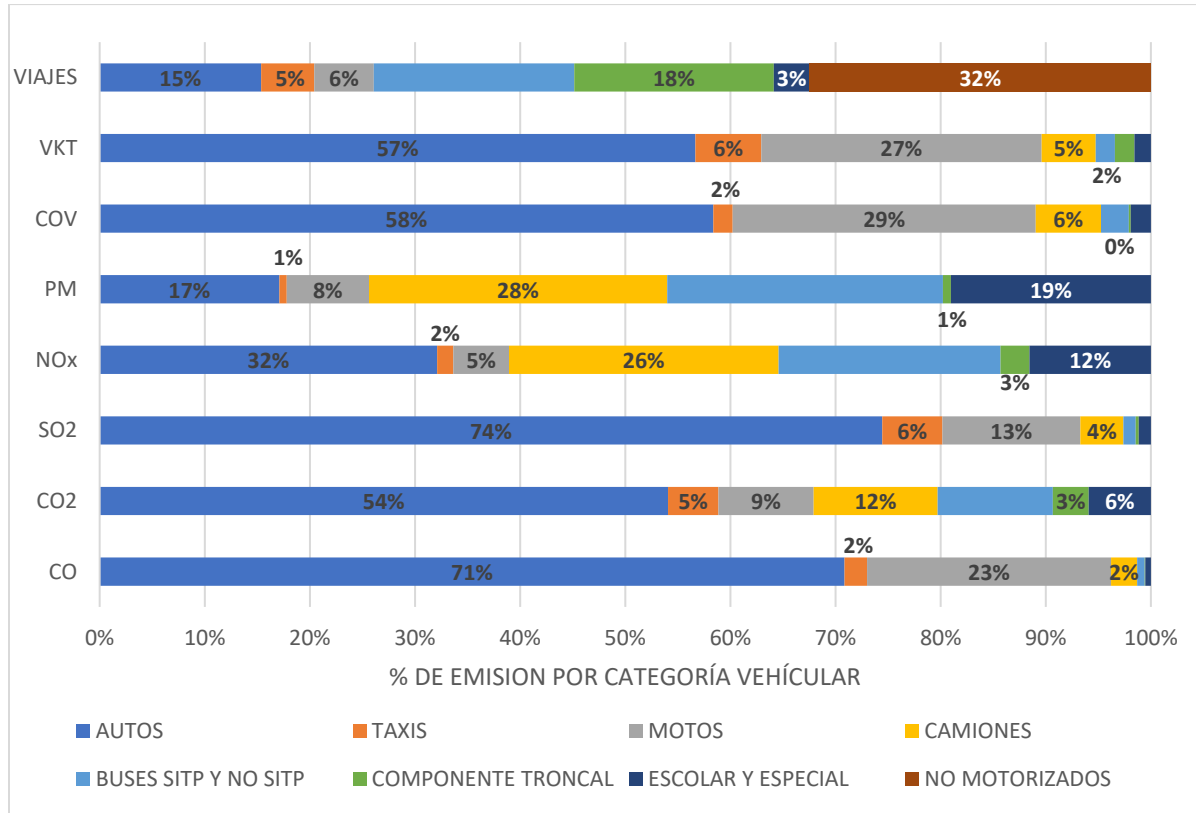
Figura 2-20. Distribución interna de emisión por contaminante para cada categoría vehicular.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2-21 por su parte, resume la contribución porcentual a las emisiones por tipo de vehículo para cada contaminante. Con fines de comparación incluye la contribución de cada tipología vehicular a la actividad del tráfico en la ciudad (VKT total) y los viajes desarrollados en cada uno de los modos.

Figura 2-21. Distribución de emisión por categoría vehicular para cada contaminante (comparación VKT).



Fuente: Elaboración propia

Los resultados reportados en la Figura 2-21 permiten deducir que los vehículos livianos (autos, camionetas y camperos) son los que más aportan a las emisiones en la ciudad, por ejemplo, contribuyen con más del 70 % de CO y SO_2 y, más del 50% de la emisión de COV y CO_2 . Esto es coherente con la actividad vehicular (VKT) de esta tipología (57%) pero contrasta con el reducido porcentaje de viajes que se realizan en estos tipos de vehículos (15%).

En cuanto a las motocicletas, otro de los vehículos fuertemente utilizado en la ciudad (28 % del parque automotor), se encuentra que contribuyen significativamente a las emisiones de CO (23%) y COV (29%). Además, como se puede observar, las emisiones de los Compuestos Orgánicos Volátiles obedecen aproximadamente a la distribución de la actividad vehicular,

resultando específicamente que: por cada 10,000 VKT en los automóviles, motocicletas y camiones se producen aproximadamente 5 toneladas al año de este contaminante. Recordemos que, las emisiones de *COV* al unirse con los óxidos de nitrógeno forman ozono a nivel troposférico, generando efectos perjudiciales para la salud.

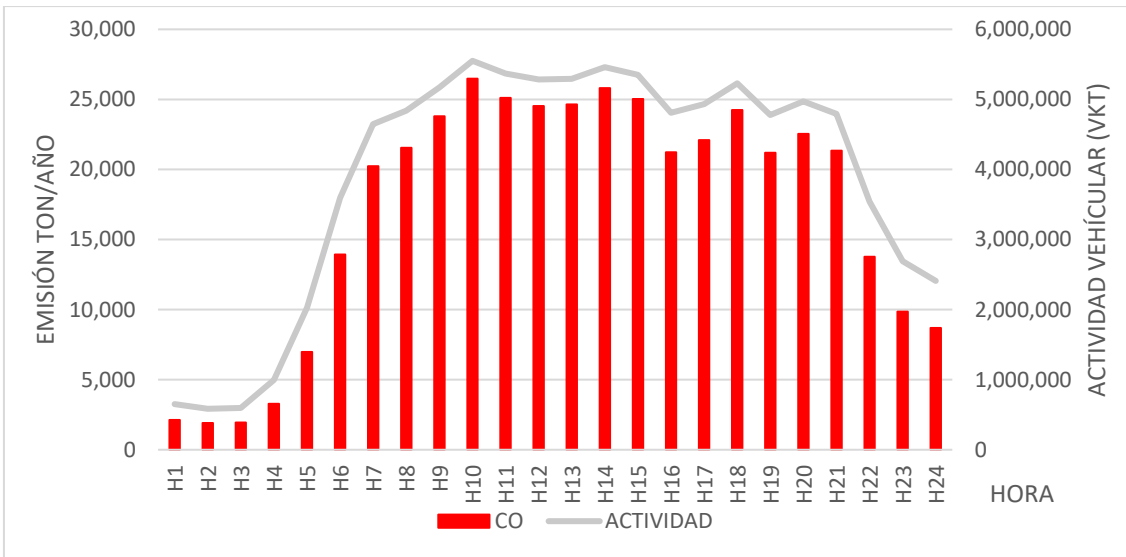
Por otro lado, un contaminante criterio bastante peligroso en términos de salud pública, debido a su intrínseca relación con enfermedades cardiovasculares y respiratorias es el $PM_{2.5}$, el cual es producido mayoritariamente por los buses SITP e intermunicipal con 26% y camiones con 28%. Adicionalmente, el transporte escolar y especial también aporta de manera importante a las emisiones de $PM_{2.5}$.

Vinculados con las concentraciones de $PM_{2.5}$, se encuentran el SO_2 y NO_x que son precursores de la formación de material particulado. Los camiones y buses proporcionan respectivamente un 26% y 21% de las emisiones de NO_2 equivalente. Paralelamente, las emisiones de SO_2 , además de ser provocadas por la actividad de los vehículos privados, son generadas en un 13% por las motocicletas y por los taxis en un 6%.

Respecto a los otros modos, específicamente el componente troncal (BRT y alimentador) tiene su mayor presencia en la distribución porcentual de las emisiones para el NO_x (2.8%) y el CO_2 (3.4%).

En la Figura 2-22 se presenta el perfil horario de la distribución temporal de emisiones de monóxido de carbono y se constata su fuerte correlación con la variación a lo largo del día de la actividad vehicular total en la ciudad. El Apéndice C contiene el comportamiento temporal para los otros contaminantes analizados en este trabajo.

Figura 2-22. Distribución temporal del tráfico relacionada con la emisión de CO.



Fuente: Elaboración propia.

La comparación de las emisiones producidas según el tipo de combustible utilizado por el parque automotor en Bogotá se condensa en la Tabla 2-13. Debido a la actividad del tránsito en 2019, la ciudad consume aproximadamente 212 millones de galones de diésel, 767 millones de galones de gasolina y 73 millones de metros cúbicos de Gas Natural Vehicular (GNV). El consumo de diésel representa en las emisiones el 56% de NO_x y el 82% de $PM_{2.5}$, mientras que, el 92% de COV y más del 97% de las emisiones de SO_2 y CO_2 , a los vehículos a gasolina.

Tabla 2-13. Distribución porcentual de las emisiones según tipo de combustible.

COMBUSTIBLE	CO	CO2	SO2	NOx	PM	VOC
GNV	0.080%	2.635%	0.000%	1.646%	0.161%	0.427%
GNV - GASOLINA	0.080%	2.624%	0.000%	1.645%	0.161%	0.427%
GASOLINA	97.856%	64.837%	96.722%	40.397%	17.595%	92.332%
GASOLINA HIBRIDOS	0.000%	0.006%	0.009%	0.000%	0.001%	0.000%
BIODIESEL	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.001%	0.000%
DIESEL	1.981%	29.591%	3.235%	56.246%	82.069%	6.811%
DIESEL HIBRIDOS	0.003%	0.306%	0.033%	0.065%	0.014%	0.004%

Fuente: Elaboración propia.

Desde otra perspectiva, se realizó el análisis espacial de las emisiones por localidad en la ciudad de Bogotá. La Tabla 2-14 muestra que las localidades de Kennedy, Suba, Engativá y Fontibón reciben aproximadamente el 50% de las emisiones de cada contaminante criterio. Esto contrasta con el número de habitantes que vive en esta zona occidental; únicamente las tres primeras localidades mencionadas representan el hogar del 42% de los ciudadanos. En particular, llama la atención que localidades más pobladas como Bosa y Usaquén, tengan un porcentaje de participación reducido en las emisiones respecto a la localidad de Fontibón.

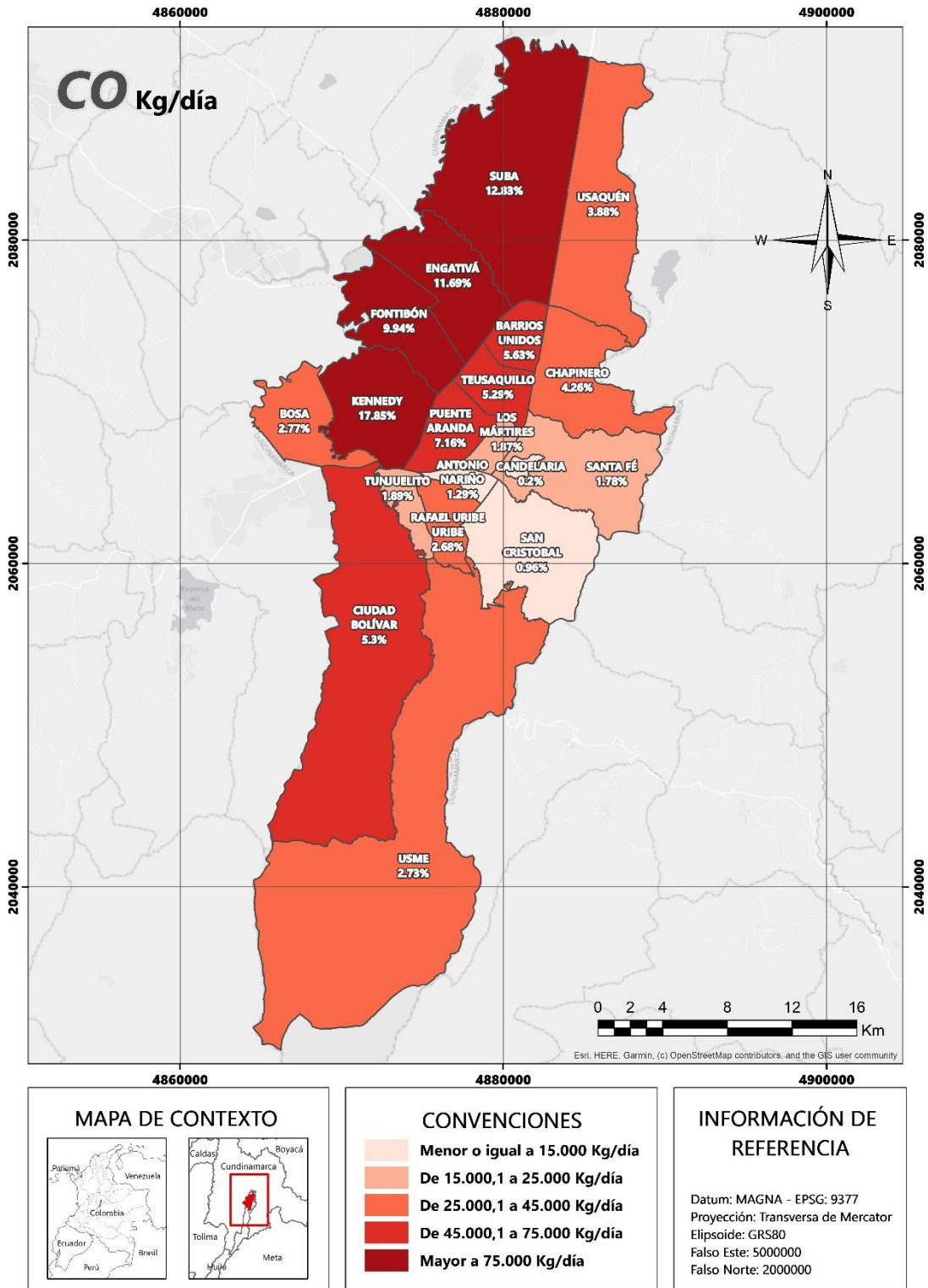
Tabla 2-14. Porcentaje de emisiones diarias en cada localidad de Bogotá D.C.

LOCALIDAD	CO	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOC
ANTONIO NARIÑO	1.3%	1.4%	1.4%	1.5%	1.5%	1.3%
BARRIOS UNIDOS	5.6%	6.0%	6.0%	6.0%	5.8%	5.4%
BOSA	2.8%	2.6%	2.5%	2.7%	2.7%	2.9%
CANDELARIA	0.2%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.2%
CHAPINERO	4.3%	4.6%	4.3%	4.6%	4.4%	4.3%
CIUDAD BOLÍVAR	5.3%	5.0%	5.0%	5.2%	5.5%	5.5%
ENGATIVÁ	11.7%	11.2%	11.5%	10.9%	10.9%	11.7%
FONTIBÓN	9.9%	9.6%	9.9%	10.0%	10.7%	10.0%
KENNEDY	17.8%	15.6%	17.1%	13.8%	13.3%	17.7%
LOS MARTIRES	1.9%	2.0%	1.9%	2.0%	1.9%	1.9%
PUENTE ARANDA	7.2%	7.3%	7.4%	7.4%	7.1%	7.1%
RAFAEL URIBE URIBE	2.7%	2.6%	2.5%	2.5%	2.5%	2.8%
SAN CRISTOBAL	1.0%	1.2%	1.0%	1.4%	1.6%	1.0%
SANTA FE	1.8%	2.9%	1.9%	3.6%	3.9%	2.0%
SUBA	12.8%	13.0%	13.2%	13.1%	13.2%	12.5%
TEUSAQUILLO	5.3%	5.3%	5.6%	4.9%	4.3%	5.0%
TUNJUELITO	1.9%	2.0%	1.9%	2.0%	2.1%	1.9%
USAQUÉN	3.9%	5.0%	4.2%	5.8%	6.1%	4.0%
USME	2.7%	2.5%	2.6%	2.4%	2.2%	2.8%

Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones para los cinco contaminantes criterio y para el CO_2 , se concentran en el área occidental de la ciudad y disminuyen conforme se avanza hacia el oriente (Figura 2-23). En las localidades ubicadas en el occidente de Bogotá se emiten más de 75,000 kg/día de CO , 7,000 kg/día de NO_x , 5,000 kg/día de COV y de 250kg/día de SO_2 . En cuanto a las emisiones de CO_2 , en las localidades de Kennedy, Suba y Engativá se emiten más de 2,500 toneladas/día. Por último, para el caso del $PM_{2.5}$ preocupan las emisiones de las localidades de Kennedy, Suba, Fontibón, Engativá y Puente Aranda adonde se reportan emisiones de más de 200kg/día. La distribución de las emisiones por localidad para cada contaminante se presenta en el Anexo C.

Figura 2-23. Distribución espacial de las emisiones de CO relacionadas con el tráfico.

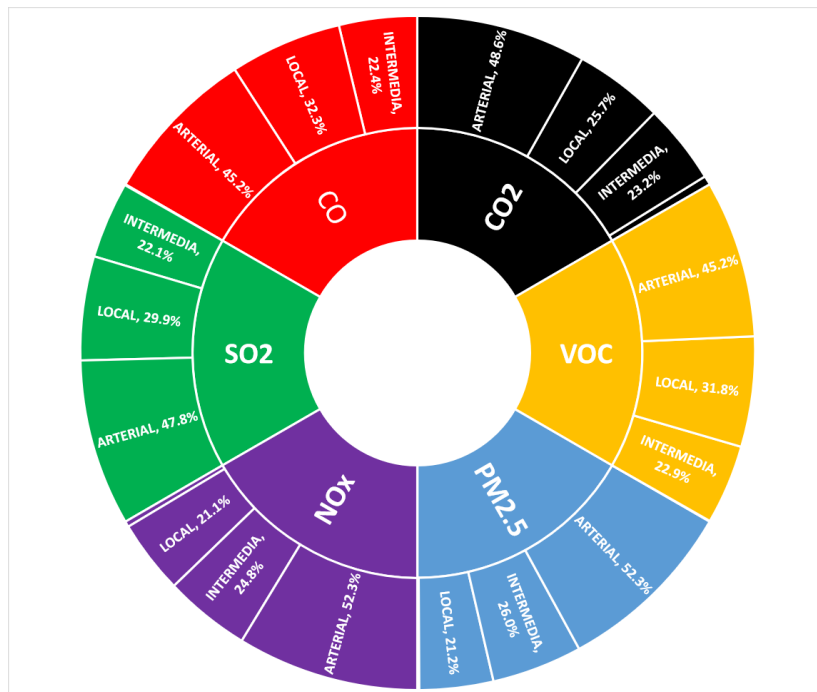


Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

Finalmente, al contar con la red vial densificada y proporcionada por el modelo privado de transporte y, asociando a cada enlace la emisión producto de la actividad vehicular para las 24 horas del día, la distribución tecnológica del parque automotor y los factores de emisión se construyó la distribución de la contaminación en todas las vías intermedias y arteriales de la zona de estudio. De igual forma, se estimaron las emisiones para cada Zona de Análisis de Transporte con el fin de reflejar la contaminación generada por la actividad vehicular intrazonal; esto se presenta en la Figura 2-25.

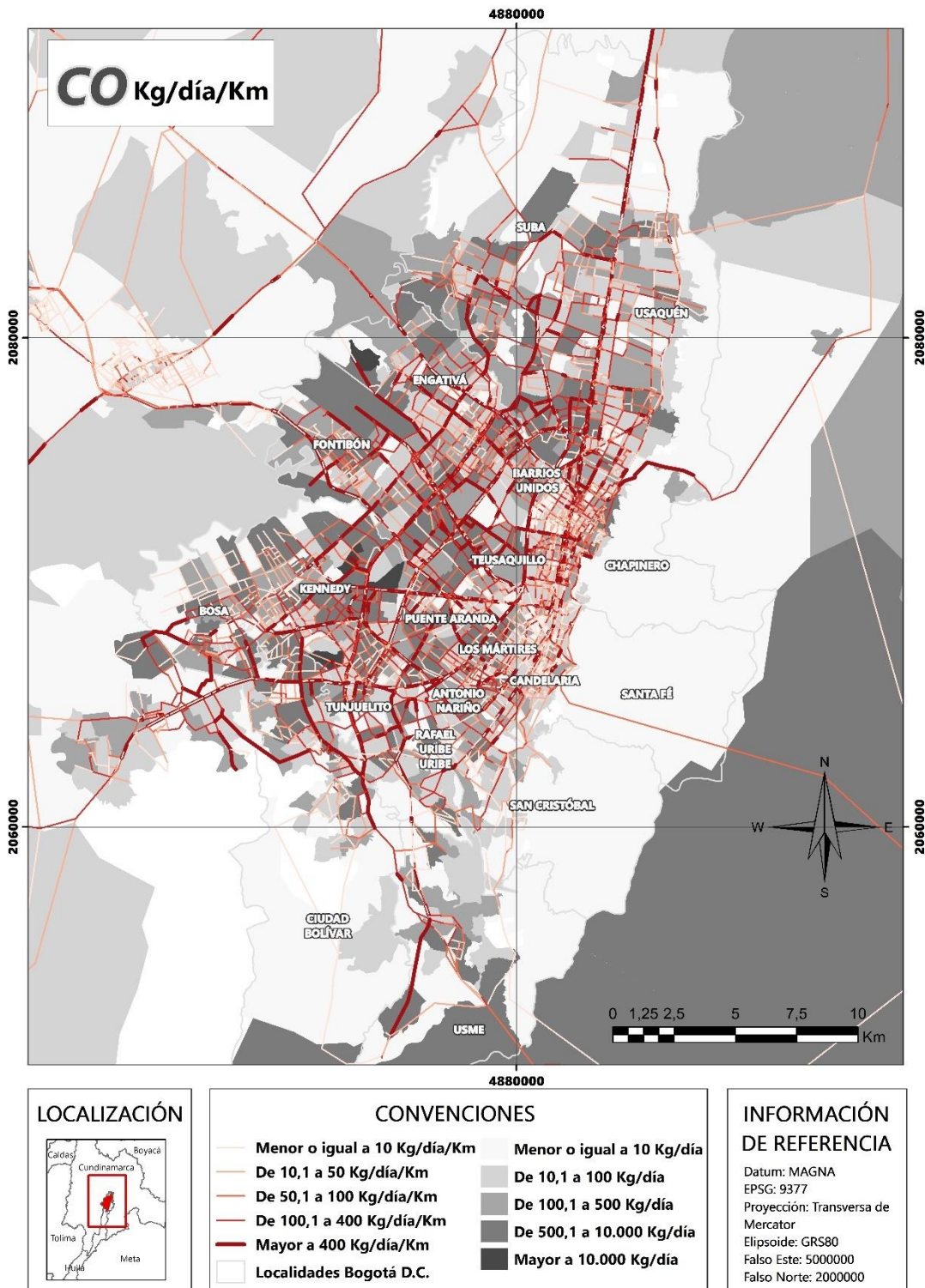
En la Figura 2-25, en primera instancia se observa que los principales corredores de emisión del contaminante CO corresponden a las vías arteriales de la ciudad, tales como la Autopista Norte, la Avenida Boyacá, la Avenida Ciudad de Cali, la Avenida de las Américas, la Avenida Suba, la Avenida Medellín, la Avenida el Dorado, entre otras. Esta distribución es también característica para los demás contaminantes (ver Anexo C). En la Figura 2-24 se presenta la distribución porcentual según el tipo de vía en la ciudad. En particular el tráfico sobre el sistema troncal contribuye con el 2.5 % de CO_2 y el 1.7 % de NO_x .

Figura 2-24. Distribución de las emisiones según el tipo de vía.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-25. Distribución espacial de las emisiones de CO en la malla vial.



Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

2.10 Análisis y comparación con estudios previos.

Para analizar la racionalidad de las estimaciones de emisiones obtenidas en el presente estudio, la siguiente sección analiza y compara los resultados con los estudios previos. Las investigaciones recientes de inventarios de fuentes móviles en la ciudad de Bogotá se presentan en la Tabla 2-15, donde se evidencia que los distintos estudios efectuados para la ciudad han empleado diferentes factores de emisión y metodologías de trabajo. El análisis y la comparación presentada a continuación hará énfasis en los estudios de Mangones (2017) y de la SDA (2020).

Tabla 2-15. Resultados estudios recientes para emisiones de fuentes móviles (Ton/año)

Investigación	Modelo de FE	Enfoque	Año	CO2	CO	NOx	PM2.5	SO2	VOC
Este estudio	COPERT V	Bottom - Up	2019	9,577,326	412,296	42,713	1,417	1,205	45,758
SDA (2021)	MOVES y Ramirez et al (2018)	Top - Down	2018	-	595,441	84,032	1,676	1,872	64,334
	MOVES y Ramirez et al (2018)	Bottom - Up	2018	-	393,953	88,094	1,907	1,278	31,522
Mangones (2017)	COPERT - CHILE	Bottom - Up	2015	-	433,536	35,943	-	1,126	55,196
Ramirez et al. (2019)	MOVES	Bottom - Up	2014	13,438,647	300,969	53,313	1,340	1,860	34,906
Carmona Aparicio et al. (2016)	SDA 2011 y Rodríguez et al. (2009)	Top - Down	2013	10,458,221	866,445	66,540	1,163	14,109	91,885
	MOVES	Bottom - Up	2013	7,254,350	717,945	48,927	1,327	12,085	74,579

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, es necesario recordar que la metodología usada por Mangones (2017) para la estimación del inventario de emisiones en la ciudad de Bogotá fue el eje estructurador de la presente investigación. La investigación de Mangones (2017) y esta investigación parten de un modelo de transporte para estimar los factores de actividad vehicular en la malla vial de Bogotá. En ese sentido, la presente investigación es una actualización del inventario que utiliza información reciente, y esto permite establecer las diferencias en las emisiones de los 6 contaminantes contemplados entre los dos años base 2015 y 2020.

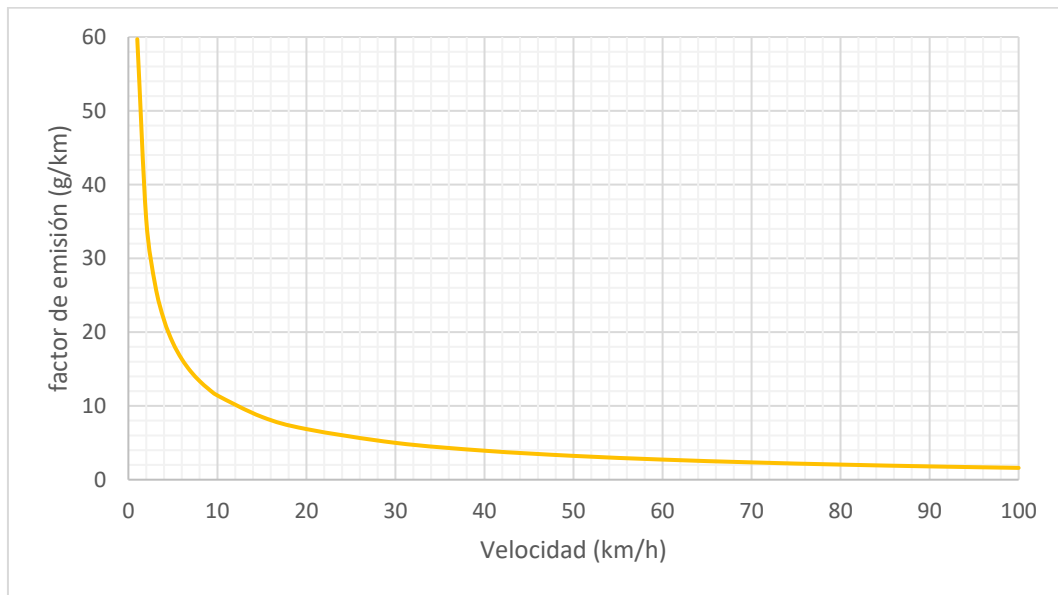
Una diferencia entre el estudio de Mangones (2017) y esta investigación tiene que ver con las velocidades promedio utilizadas para cada hora del día en la estimación de los factores de emisión a partir de modelo de COPERT V. El estudio de Mangones (2017) utiliza las velocidades de operación en los corredores extraídas directamente del modelo privado de transporte, sin embargo, las ecuaciones de las tasas de emisión del modelo COPERT fueron calibradas para ciertos rangos permitidos de este parámetro macroscópico.

En contraste esta investigación ajustó las velocidades proporcionadas por el modelo de transporte y efectuó el cálculo de los FE respetando los límites establecidos por el Apéndice 4 del capítulo “1.A.3.b.i-iv Transporte por carretera”, de la guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP/EEA 2019.

A pesar de que Mangones (2017) hace un llamado a la precaución del uso de COPERT – Chile especialmente en los factores de emisión de CO y NOx para buses a bajas velocidades, se presume que el uso de estos FE adaptados a las condiciones de tráfico de Santiago de Chile fue un factor diferenciador en los resultados reportados entre las dos investigaciones, aun cuando las variaciones no son preocupantes y podrían ser explicadas por los cambios en la oferta de servicios de transporte.

Como se puede observar en la Figura 2-26, donde se presenta la curva de emisión para COV , para los camiones a gasolina sin norma (convencionales) menores a 3.5 toneladas, la variación de la tasa de emisión es drástica cuando la velocidad es menor a 10 km/h. Esto concuerda con las recomendaciones de COPERT V sobre la velocidad de operación que puede ser aplicada en la ecuación del factor de emisión para esta tipología, que debe estar entre 12 km/h y 84km/h. Además, todos los rangos de las ecuaciones de COPERT V respetan la velocidad promedio de recorrido de Bogotá de 32 km/h (Figura 2-15), garantizando de cierta forma las condiciones promedio de operación en las vías.

Figura 2-26. Curva de emisión para camiones a gasolina sin norma (convencionales) menores a 3.5 toneladas para COV (Modelo COPERT V).

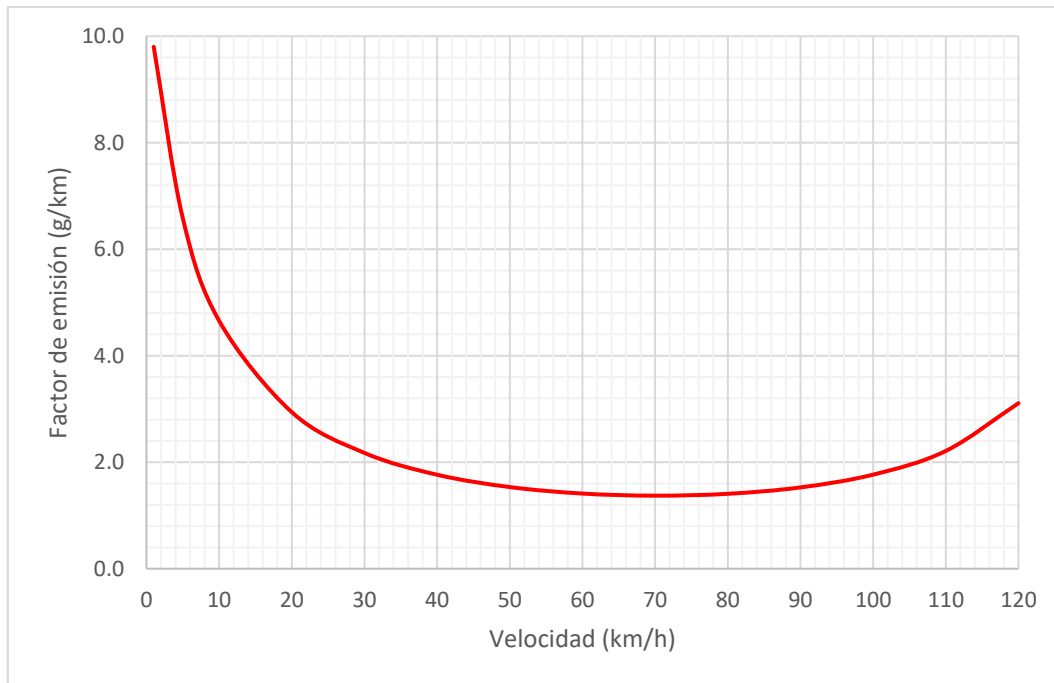


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-27, se puede observar un comportamiento similar, pero en menor proporción para el monóxido de carbono. Mientras que las emisiones de *COV* para una velocidad de 5km/h pueden aumentar un 118% respecto al límite inferior permitido (12 km/h) por la calibración de la ecuación; el *CO* puede aumentar hasta un 50% al introducir velocidades inferiores a los 5km/h que es el límite inferior de la ecuación de emisión para monóxido de carbono en los vehículos livianos a gasolina con tecnología euro 1.

Consecuentemente, para el desarrollo de la presente investigación las velocidades de cada enlace para las 24 horas del día para cada categoría vehicular y que provienen del modelo de transporte; se ajustaron con el fin de cumplir con los límites de trabajo de las ecuaciones calibradas por el modelo COPERT V. Además, esto se efectuó con el objetivo de no sobreestimar las emisiones resultantes para cada contaminante. Cabe resaltar que esta “corrección” no anula el trasfondo de la investigación de contemplar información desagregada y que represente lo más fielmente posible las condiciones de operación del tráfico de Bogotá

Figura 2-27. Curva de emisión para vehículos livianos a gasolina euro 1 para CO (Modelo COPERT V).



Fuente: Elaboración propia

A diferencia de otros enfoques de investigación, en este estudio no se contemplan velocidades promedio a lo largo de todo un corredor en la ciudad. Esta suposición omitiría las condiciones reales del comportamiento del tráfico en la red vial de Bogotá y obviaría problemáticas asociadas a la contaminación atmosférica como la congestión. Esta externalidad asociada al transporte directamente influye en las velocidades de los segmentos viales que pueden variar drásticamente a lo largo de los corredores, especialmente para vías arteriales e intermedias y que, como ya se expuso, pueden llegar a subestimar o sobreestimar las emisiones totales. Por tanto, las diferencias respecto a los resultados obtenidos por Mangones (2017) obedecen al ajuste de las velocidades.

Además, es importante resaltar nuevamente que se establecieron un total de 295 factores de emisión para cada contaminante debido a que cada categoría vehicular fue desagregada lo máximo posible para clasificarse según el segmento europeo bajo el cual el modelo COPERT V establece sus FE. Esto brinda mayor seguridad en los resultados obtenidos en

la presente investigación, puesto que no se utilizaron un número limitado de FE que supusieran un mismo conjunto de características para todos los vehículos que conforman una misma categoría vehicular.

Por otro lado, el inventario consolidado bajo los dos enfoques de estimación reportado por parte de la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá para el año 2020, representan los valores oficiales de comparación, consulta y discusión. Para el caso específico de las emisiones reportadas de CO_2 , los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por Ramírez y Carmona Aparicio et al. (2016) son fundamentales ya que constituyen los únicos puntos de referencia para la comparación de las emisiones de este contaminante. Las estimaciones de los tres estudios están en mismo orden de magnitud, no obstante, se reportan diferencias en las toneladas al año de dióxido de carbono estimadas.

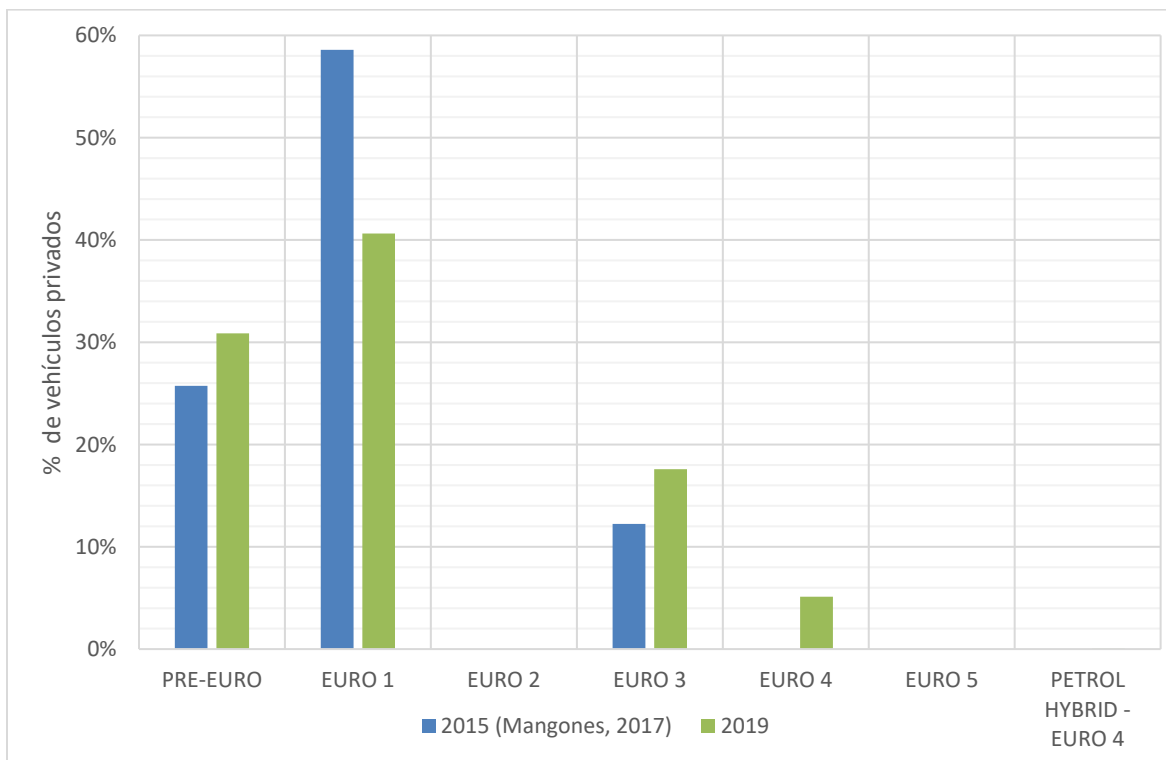
El presente estudio reporta una estimación 40% menor que el estudio de Ramirez et al. (2019) y 24% mayor que el estudio de Carmona et al. (2016). Sin embargo, como se expone en el capítulo 3, la comparación de las emisiones de CO_2 calculadas con base en el consumo efectivo de combustible en la ciudad, respecto a las emisiones de CO_2 con enfoque Bottom-Up del presente estudio, reportan diferencias de tan sólo 5.4%, lo que es razonablemente cercano. Las diferencias reflejadas principalmente con el estudio de Ramirez et al. (2019) podrían ser explicadas por la mejora tecnológica de la flota vehicular.

Ahora bien, respecto a las emisiones de CO se evidencia una disminución de 4.9% respecto a las estimaciones de Mangones (2017) que usa el enfoque Bottom – Up basado en un modelo de transporte. De igual manera, las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles presentan una reducción significativa de 17% en los 4 años de diferencia entre los estudios.

En concordancia con estas disminuciones expuestas, la distribución tecnológica del parque automotor ha cambiado a lo largo de esta ventana de tiempo entre los únicos dos estudios realizados hasta el momento con información de un modelo de transporte; evidenciando una renovación tecnológica. Como se puede observar en la Figura 2-28 los vehículos privados pre-euro y euro 1 a gasolina redujeron su porcentaje de participación en 5% y 18%

respectivamente, para dar paso a un mayor número de vehículos euro 3 (18%) y euro 4 (5%). Esto sugiere una reducción razonable en proporción de emisiones para todos los contaminantes, al ser los automóviles, camperos y camionetas la categoría vehicular con mayor participación en todas las emisiones a excepción del $PM_{2.5}$. Igualmente, esta distribución justificaría la diferencia de -6% en las emisiones SO_2 reportadas por la SDA (2020) bajo el enfoque Bottom - Up.

Figura 2-28. Distribución tecnológica de la flota vehicular entre 2015 y 2019.



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, para la línea base los camiones tuvieron una reducción de 17.7% en el estándar pre – euro y un aumento de 10% en euro 2 y de 22% en euro 4, respecto al estudio de Mangones (2017). Del mismo modo, respecto a este estudio, el sistema de transporte público contó en el componente zonal del SITP (incluyendo el SITP Provisional) con un aumento de 5% en vehículos a gas natural, una reducción de 10% en los vehículos de gasolina, un aumento de 25% de vehículos a diésel euro 5 y del 3% en vehículos euro 6. El

componente alimentador por su parte reflejó un incremento en tecnología diésel del 67% para euro 5, 7 % para euro 6 y 18% para vehículos a gas natural. Finalmente, el sistema BRT tiene el 34% de sus unidades de servicio en euro 6 a gas natural, 21% euro 5 a diésel y 35% euro 6 a diésel.

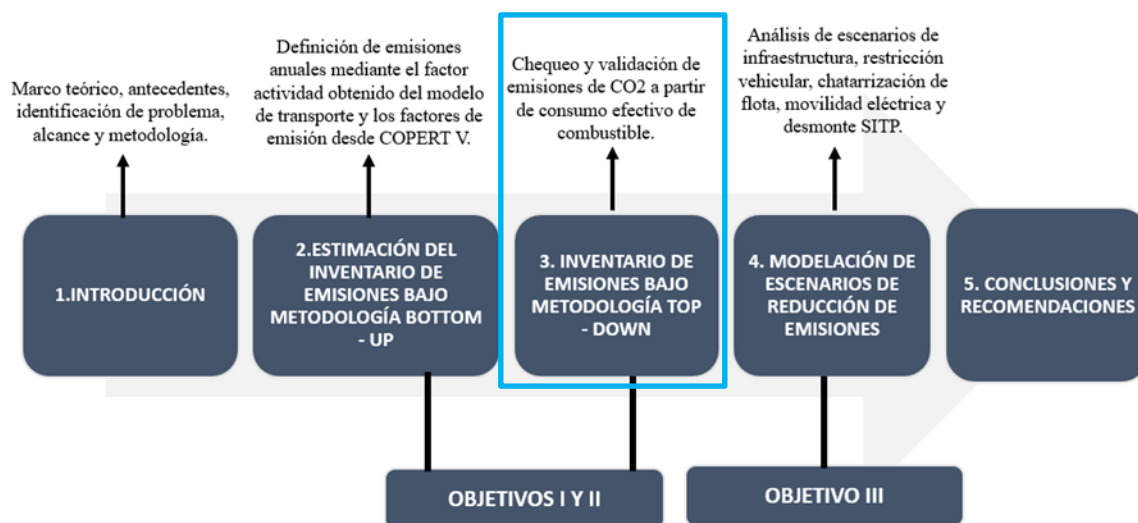
Estas cifras entran en concordancia con la disminución de las emisiones reportadas de $PM_{2.5}$ respecto al inventario de la Secretaría Distrital de Ambiente para la línea base de 2018, puesto que los camiones y los buses reportan conjuntamente el 50% de las emisiones de material particulado.

Finalmente, haciendo referencia al inventario de emisiones establecido por la SDA para el año 2018, se presentan resultados similares en orden de magnitud para todos los contaminantes criterio a excepción del NO_x . Los FE establecidos por la SDA presentan diferencias significativas respecto a los definidos por el presente estudio, como se puede observar en la Tabla 3-2 del capítulo 3.

3. Inventario de emisiones bajo metodología Top – Down.

Este capítulo establece un inventario de emisiones bajo un enfoque Top – Down con el objetivo de validar los resultados obtenidos en el capítulo precedente. Igualmente, este apartado brinda seguridad y ratifica el cumplimiento del primer y segundo objetivo específico de esta investigación (Figura 3-1).

Figura 3-1. Diagrama de contenido de la investigación – Capítulo 3.



Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de este capítulo considera 4 secciones para la verificación de las emisiones reportadas bajo la metodología Bottom – Up, mediante la estimación de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Dicho cálculo se efectuó mediante la cuantificación del consumo efectivo de combustible (Sección 3.1) a partir de la actividad vehicular contemplada en la Tabla 2-5. Esta estimación para este Gas de Efecto Invernadero se llevó a cabo por medio

de una relación estequiométrica y de factores de emisión proporcionados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (Sección 3.3).

Así mismo, en la Sección 3.2 se definen factores de emisión ponderados al aplicar la velocidad promedio de Bogotá expuesta en la Figura 2-15, en cada una de las funciones de emisión contempladas en la metodología Bottom – Up y obtenidas a partir del modelo de emisiones de COPERT V. Estos factores estimados se ponderaron posteriormente a través de la distribución porcentual tecnológica evidenciada en la Figura 2-18 para 9 categorías vehiculares de acuerdo con el tipo de combustible utilizado.

Finalmente, se presenta una discusión de resultados en la sección 3.4 donde se comparan las emisiones estimadas bajo las dos metodologías, Top – Down y Bottom – Up.

3.1 Estimación de consumo efectivo de combustible.

Se estimó el consumo de combustible efectivo debido a la actividad del tráfico y al rendimiento de consumo para cada tipología vehicular con el fin de validar el resultado de las emisiones del anterior capítulo. Los valores de actividad vehicular se estimaron a partir de la Tabla 2-5 y la proporción de vehículos por cada categoría que utilizan gasolina, diésel y GNV (Tabla 3-1).

Por otro lado, los valores de rendimiento de combustible se obtuvieron a partir del Primer Balance de Energía útil para Colombia del año 2019 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2019); donde se tomó el promedio de los valores reportados a nivel nacional y Bogotá para automóviles, camionetas, motocicletas, taxi¹³, bus, buseta, microbús, camión y tractocamión. Las tasas de rendimiento de gasolina y diésel para los buses que circulan en la ciudad y que no pertenecen al SITP implementado, así como para el

¹³ El Primer Balance de Energía útil para Colombia del año 2019 de la UPME, solo reporta valores de rendimiento a nivel nacional.

componente urbano zonal, se calcularon mediante un proceso de ponderación a partir de los registros de microbuses, busetas y buses de la base de datos proporcionada por el RUNT (Sección 2.7).

Específicamente para el caso de vehículos del SITP (componente zonal, alimentador y troncal) se obtuvieron los factores de rendimiento a partir de un estudio de Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público Masivo de Bogotá realizado por (Pulido Castillo et al., 2017). Igualmente, se aplicó un promedio ponderado a estos valores a partir de la información de la distribución de la flota según la capacidad de los vehículos reportada por Transmilenio S.A.

De igual forma para los automóviles y los taxis se asumió como parque efectivo el 50% de la flota debido a la medida de restricción a la circulación vigente en la ciudad (Decreto 002 de 2022), para los vehículos livianos y los taxis.

Ecuación 3-1. Metodología para estimar el consumo efectivo de combustible.

$$\text{Consumo} = \text{Flota}_{\text{combustible}} \times \text{VKT}_{\text{día}} \left(\frac{\text{km}}{\text{veh} \times \text{día}} \right) \times \text{días} \times \left(\frac{1}{\text{rendimiento} \left(\frac{\text{km}}{\text{gal}} \right)} \right)$$

El consumo efectivo de cada tipo de combustible se calculó usando la Ecuación 3-1 basada en la investigación de Trejos (2021, p.165) y los resultados se reportan en la Tabla 3-1. El consumo para la línea base es de aproximadamente 767 millones de galones de gasolina, 212 millones de galones de diésel y 73 millones de metros cúbicos de Gas Natural Vehicular (GNV). Por otro lado, al contrastar con la estimación de consumo efectivo de gasolina para 2015 (660 millones de galones), efectuada en el Primer Balance de Energía útil para Colombia (UPME, 2019), se obtiene una diferencia del 5.4% respecto a la línea base. Lo anterior es coherente y razonablemente cercano con el aumento del 12% del parque automotor para el año 2019 (2'441,773 vehículos) (SDM, 2019) respecto al año 2015 (2'148,541 vehículos) (SDM, 2015). Respecto al consumo de diésel se presentó tan solo una diferencia del 7.5% respecto al año 2015 (228 millones de galones), que se presume puede

corresponder a la renovación tecnológica del sistema de transporte público relacionada con la entrada en operación de vehículos a GNV y tecnologías híbridas.

Tabla 3-1. Consumo efectivo combustible del parque automotor.

Categoría vehicular		Rendimiento (km/gal)	VKT $\frac{km}{veh - día}$	% de aporte	Flota	Consumo (gal)	Consumo (m ³)
Vehículos particulares	<i>Diesel</i>	43	54	4.54%	49,014	20,426,198	77,322
	<i>Gasolina</i>	30	54	94.23%	1,017,849	607,994,929	2,301,510
	<i>GNV</i>	13.5	54	1.23%	13,269		17,614,017
Taxi	<i>Diesel</i>	65	197	0.56%	183	182,658	691
	<i>Gasolina</i>	50	197	77.78%	25,637	33,259,870	125,902
	<i>GNV</i>	13	197	21.67%	7,142		35,634,995
Motocicleta	<i>Gasolina</i>	100	58	100.00%	477,340	91,068,661	344,732
Buses SITP Implementado	<i>Diesel</i>	16.8	147	90.36%	5,734	16,477,049	62,372
	<i>GNV</i>	5.0	147	9.64%	612		5,925,357
Buses NO SITP Implementado	<i>Diesel</i>	14.4	94	95.29%	29,886	64,487,781	244,113
	<i>Gasolina</i>	16.0	94	2.42%	758	1,469,440	5,562
	<i>GNV</i>	6.1	94	2.29%	718		3,629,160
Buses Alimentador	<i>Diesel</i>	9.8	243	81.53%	565	4,591,964	17,382
	<i>GNV</i>	5.0	243	18.47%	128		2,048,949
Buses Transmilenio	<i>Diesel</i>	9.2	249	66.39%	1,384	12,376,993	46,852
	<i>Gasolina</i>						
	<i>GNV</i>	5.0	249	33.61%	701		34,635,844
Camión pequeño	<i>Diesel</i>	15.0	218	74.52%	16,124	77,493,506	293,345
	<i>Gasolina</i>	11.0	218	22.98%	4,972	32,582,427	123,338
	<i>GNV</i>	5.0	218	2.50%	540		7,789,362
Camión grande	<i>Diesel</i>	12.2	169	95.34%	3,408	15,600,067	59,053
	<i>Gasolina</i>	10.9	169	4.66%	166	854,013	3,233

Fuente: Elaboración propia

3.2 Factores de emisión ponderados para Bogotá D.C.

El consumo de combustible es insumo fundamental para el chequeo de las emisiones de CO₂ a través del establecimiento de una relación estequiométrica y de factores de emisión estimados por la UPME. Sin embargo, en la estimación de las emisiones totales para los 5

contaminantes criterio restantes contemplados es necesario definir los FE a partir de COPERT V.

Se establecieron factores de emisión promedio ponderados (Tabla 3-2) al evaluar la velocidad media de Bogotá 32 km/h (Figura 2-15) y aplicarla para cada una de las funciones de emisión utilizadas en el enfoque Bottom – Up. Posteriormente, se efectuó una ponderación con los resultados obtenidos de acuerdo con la distribución porcentual tecnológica definida en la Figura 2-18.

Adicionalmente, los factores de emisión proporcionados por COPERT V (g/km) se convirtieron a gramos de contaminante por kilogramo de combustible a través de los valores de rendimiento (km/gal) y los valores de densidad de la gasolina ($851.9 kg/m^3$) y del diésel ($741.2 kg/m^3$). Este proceso se describe mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 3-2. Conversión de FE COPERT V – Enfoque Top – Down.

$$FE \left(\frac{g}{kg} \right) = FE_{COPERT} \left(\frac{g}{km} \right) * rendimiento \left(\frac{km}{gal} \right) * \left(\frac{1 gal}{0.00378 m^3} \right) * Densidad \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-2. Factores de emisión ponderados Top – Down (g / kg combustible).

Categoría vehicular	Combustible	CO	CO ₂	NO _x	CO	SO ₂	COV
Autos Particulares	Gasolina	115.085	2386.910	7.787	0.077	0.232	10.009
Autos Particulares	Diesel	5.145	2719.603	9.266	1.320	0.036	1.155
Autos Particulares	GNV	0.016	10.854	0.005	0.000	0.000	0.001
Taxis	Gasolina	56.876	2844.541	5.696	0.062	0.457	5.146
Taxis	Diesel	14.137	3977.280	11.259	4.419	0.053	3.312
Taxis	GNV	0.015	9.348	0.005	0.000	0.000	0.001
Motocicletas	Gasolina	254.081	2396.176	8.658	0.434	0.437	31.762
Camiones Pequeños	Gasolina	48.060	1635.604	16.110	0.007	0.298	12.004
Camiones Pequeños	Diesel	5.907	2076.130	19.637	0.918	0.028	1.961
Camiones Pequeños	GNV	0.006	3.314	0.002	0.000	0.000	0.000
Camiones Grandes	Gasolina	18.868	2517.758	24.841	0.000	0.459	17.062
Camiones Grandes	Diesel	9.913	4082.150	48.787	1.241	0.055	2.822
Buses NO SITP implementado	Gasolina	10.901	1339.278	1.629	0.018	0.244	1.101

Categoría vehicular	Combustible	CO	CO ₂	NO _x	CO	SO ₂	COV
Buses NO SITP implementado	Diesel	12.252	4327.104	41.630	1.764	0.058	4.943
Buses NO SITP implementado	GNV	0.206	54.504	0.535	0.001	0.000	0.180
Buses SITP implementado	Diesel	5.001	5263.299	29.442	0.360	0.070	0.773
Buses SITP implementado	GNV	0.020	27.158	0.095	0.000	0.000	0.022
Alimentador	Diesel	2.532	3717.883	16.487	0.170	0.050	0.377
Alimentador	GNV	0.020	27.158	0.095	0.000	0.000	0.022
Transmilenio	Diesel	2.290	4756.368	13.568	0.167	0.064	0.361
Transmilenio	GNV	0.020	27.158	0.095	0.000	0.000	0.022

Fuente: Elaboración propia

3.3 Validación de emisiones de CO₂.

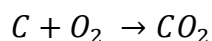
La validación de las emisiones de CO₂ consistió en las estimaciones bajo tres vertientes de trabajo:

1. Por medio de relaciones estequiométricas.
2. Bajo factores de emisión proporcionados por la Unidad de Planeación Minero-Energética.
3. Implementando factores de emisión extraídos del modelo COPERT V.

Para cada línea de desarrollo se estimaron los resultados de las emisiones partiendo del consumo efectivo de combustible del parque automotor.

3.3.1 Emisiones de CO₂ por estequiometria.

Las emisiones de CO₂ por relación estequiométrica se cuantificaron mediante la equivalencia de carbono a dióxido de carbono y el contenido de carbono propio de cada combustible. La proporción de gramos de C y gramos de CO₂, se presenta a continuación:



$$\frac{CO_2}{C} = \frac{44}{12} \approx 3.67$$

Por su parte, el contenido de carbono de la gasolina y del diésel es aproximadamente del 85.76% y 85.19%. Para el Gas Natural Vehicular se usó directamente el FE de la UPME (2.18 Kg CO₂/ m³). La metodología resultante para la estimación se presenta en la Ecuación 3-3 basada en la investigación de Trejos (2021, p.165) y los resultados producto del consumo efectivo en la Tabla 3-3.

Ecuación 3-3. Metodología de estimación de emisiones de CO₂ por relación estequiométrica.

$$Emisión_{CO_2} = Consumo\ combustible_x * Densidad_x * \frac{Cont\ azufre}{100} x\ relación\ \frac{CO_2}{C}$$

Tabla 3-3. Emisiones anuales de CO₂ por estequiometría a partir de consumo efectivo de combustible.

Indicador	Gasolina	Diésel	GNV
Carbono total (kg)	1,846,113,128	581,406,853	
Equivalencia CO ₂ (Ton)	6,769,081	2,131,825	158,279
Emisiones de CO ₂ (Ton)	9,059,185.91		

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Emisiones de CO₂ por a partir de los FE de la UPME.

La metodología de cálculo a través de los factores de emisión de la UPME para el chequeo de las emisiones de CO₂ debidas al consumo efectivo de combustible, se basó en la Ecuación 3-4. Los kilogramos de CO₂ emitidos por cada metro cúbico de gasolina consumido según la UPME son 8.8 kg, mientras que para el diésel son de 10.15 kg.

Ecuación 3-4. Metodología de estimación emisiones CO₂ con FE de la UPME.

$$Emisión_{CO_2}: FE_{UPME} \left(\frac{kg\ CO_2}{gal} \right) x (Consumo\ combustible) \left(\frac{gal}{año} \right) x \left(\frac{1ton}{1000kg} \right)$$

Las emisiones consecuentes de esta metodología en toneladas al año se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Emisiones anuales de CO₂ por FE UPME a partir de consumo efectivo.

Indicador	Gasolina	Diésel	GNV
Consumo [gal]	767,229,340	211,636,215	
FE [kg CO ₂ /gal]	8.8085	10.1490	
Consumo GNV [m ³]			72,641,841
FE GN-UPME [kg CO ₂ /m ³]			2.1789
Equivalencia CO ₂ [kg]	6,758,139,643	2,147,895,942	158,279,307
Emisiones de CO ₂ [Ton]	9,064,315		

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Emisiones de CO₂ de los contaminantes criterio a partir de los FE de COPERT V.

La tercera metodología empleada para contrastar las emisiones producidas consistió en utilizar los FE ponderados del modelo COPERT V consolidados en la Tabla 3-2 mediante la Ecuación 3-5. Los resultados se reportan en la Tabla 3-5.

Ecuación 3-5. Metodología de estimación emisiones con FE de COPERT V.

$$Emisión_{CO_2} = FE \times (Consumo) \times Densidad \times \% \text{ de aporte categoría veh}_i$$

Donde:

- *FE* = Factor de emisión de ponderado de COPERT V (*g/kg_{combustible}*).
- *Densidad* = Densidad del combustible (*kg/m³*).
- *Consumo* = Consumo efectivo (*m³*).
- *% de aporte* = Participación de la categoría *i* por tipo de combustible.

Tabla 3-5. Emisiones anuales de CO₂ por FE ponderados COPERT V a partir de consumo efectivo.

Categoría vehicular	Combustible	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
AUTOS	Gasolina	196,320	4,071,781	13,284	132	396	17,075
	Diesel	338.89	179,140.81	610.38	86.96	2.39	76.08
	GNV	43.96	30,299.79	14.23	0.30	0.00	2.88

Categoría vehicular	Combustible	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
CAMIONES GRANDES	Gasolina	45.21	6,032.91	59.52	0.00	1.10	40.88
	Diesel	27.30	11,242.29	134.36	3.42	0.15	7.77
CAMIONES PEQUEÑOS	Gasolina	4,393.54	149,523.63	1,472.76	0.67	27.25	1,097.34
	Diesel	1,476.18	518,825.62	4,907.35	229.35	6.93	490.07
	GNV	7.20	4,091.38	2.33	0.05	0.00	0.51
MOTOS	Gasolina	64,921.53	612,260.26	2,212.37	110.81	111.59	8,115.75
TAXIS	Gasolina	5,307.577	265,449.017	531.574	5.824	42.666	480.265
	Diesel	8.33	2,342.75	6.63	2.60	0.03	1.95
	GNV	10.18	5,784.13	3.29	0.07	0.00	0.72
BUS SITP IMPLEMENTADO	Diesel	265.72	279,665.60	1,564.40	19.10	3.74	41.05
	GNV	19.08	25,504.14	89.11	0.25	0.00	20.60
BUS NO SITP IMPLEMENTADO	Gasolina	44.94	5,521.68	6.71	0.08	1.01	4.54
	Diesel	2,547.84	899,862.77	8,657.39	366.91	12.02	1,028.01
	GNV	1,862.44	15,282.46	149.89	0.17	0.00	50.42
ALIMENTADOR	Diesel	37.50	55,054.88	244.15	2.52	0.74	5.58
	GNV	6.60	8,819.16	30.82	0.09	0.00	7.12
TRANSMILENIO	Diesel	0.81	1,083.95	3.79	0.01	0.00	0.88
	GNV	37.08	49,563.82	173.18	0.48	0.00	40.03
Total		277,722.23	7,197,131.60	34,158.66	961.65	605.17	28,587.31

Fuente: Elaboración propia

3.4 Análisis y comparación de resultados.

Las diferencias porcentuales del chequeo las emisiones de dióxido de carbono bajo el uso de la relación estequiométrica y de FE proporcionados por la UPME presentan diferencias negativas de 5.4% respecto a la estimación de la metodología de alta resolución (Tabla 3-6). Lo anterior, brinda mayor confiabilidad a los resultados reportados en el capítulo precedente.

Tabla 3-6. Consolidado chequeo emisiones de CO₂.

Emisión de CO ₂ debidas a:	Consumo
Enfoque Bottom - Up	9,577,326
FE COPERT Ponderados (ton/año)	7,197,132
Estequiometria (ton/año)	9,059,185
FE UPME (ton/año)	9,064,314
% Diferencia de emisión Bottom - Up / FE COPERT	-20.6%
% Diferencia de emisión Bottom - Up / FE Estequiometría	-5.4%
% Diferencia de emisión Bottom - Up / FE UPME	-5.4%

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la valoración ejecutada con los factores de emisión ponderados de COPERT V, se evidencia la mayor diferencia (20.6%). Lo anterior es congruente con el análisis presentado en el capítulo 2, donde se deduce que el cálculo de las emisiones depende de la velocidad introducida en las funciones proporcionadas por el modelo. Por tanto, los factores de emisión ponderados a pesar de ser calculados con la distribución tecnológica del parque automotor no representan en su totalidad las condiciones reales de tráfico, al trabajar con velocidades de operación promedio altamente agregadas con el fin de representar este parámetro macroscópico para toda la malla vial de la ciudad.

Finalmente, en la Tabla 3-7 se presenta los resultados de las emisiones bajo el enfoque Top – Down para todos los contaminantes criterio y para CO_2 .

Tabla 3-7. Consolidado de las emisiones bajo enfoque Top – Down (Ton/año).

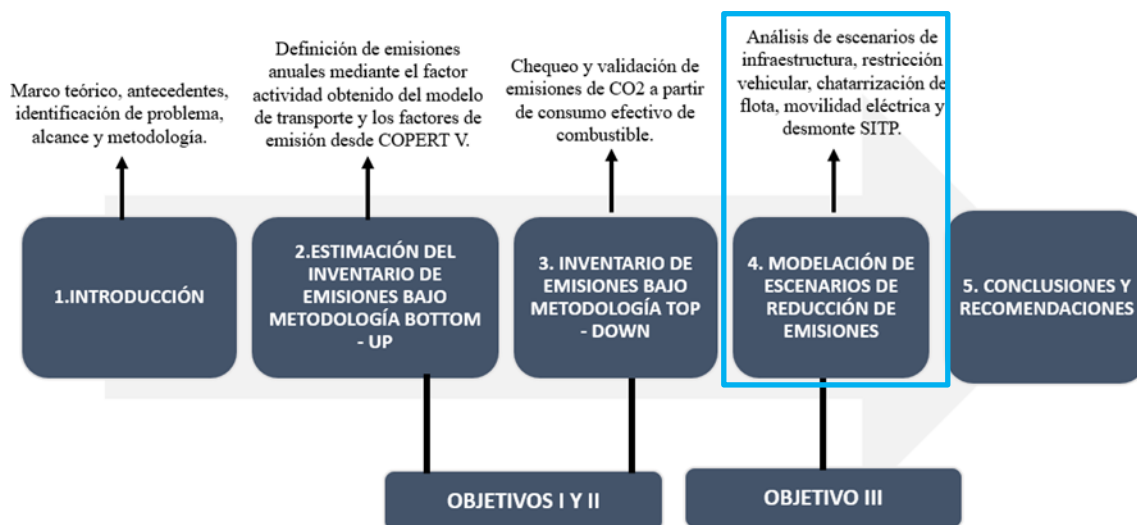
Enfoque	CO	CO_2	SO_2	NO_x	$PM_{2.5}$	COV
Bottom - Up	412,296	9,577,326	1,205	42,713	1,417	45,758
Top - Down	277,722	7,197,132	605	34,159	962	28,587

Fuente: Elaboración propia

4. Modelación de escenarios de reducción de emisiones.

Este capítulo contempla 6 secciones para el cumplimiento del tercer objetivo específico propuesto del presente estudio, que concierne a la modelación de escenarios de reducción de emisiones a partir de la variación de la oferta del sistema de transporte de Bogotá D.C (Figura 4-1).

Figura 4-1. Diagrama de contenido de la investigación – Capítulo 4.



Fuente: Elaboración propia.

Posterior al establecimiento del inventario de emisiones para la línea base en Bogotá D.C bajo la metodología Bottom – Up y de la validación Top – Down realizada en el capítulo precedente, se evaluaron 21 escenarios de variación y reducción de emisiones.

La evaluación de estos escenarios se ejecutó en 5 ejes de trabajo como se describe a continuación:

1. Escenarios de variación de oferta de infraestructura.
2. Escenarios de programas de restricción vehicular.
3. Escenarios de chatarrización de flota.
4. Escenarios de tecnología vehicular eléctrica y de bajas emisiones.
5. Escenario de desmonte y salida de circulación del SITP Provisional.

El primer eje de trabajo considera las salidas del modelo privado de transporte, que representaron las condiciones futuras de operación del tráfico en Bogotá debido a las 10 obras de gran impacto de infraestructura a ejecutar en los próximos años. Este eje contempló dos vertientes de acción, oferta base – demanda futura y, oferta futura – demanda futura; con el fin de comparar la situación hipotética de no efectuar ninguna obra en los años venideros y su efecto en las emisiones producidas por las fuentes móviles en ruta.

La segunda y tercera línea de trabajo se fundamentan en la normativa nacional y distrital, mientras que, el cuarto eje de modelación considera los lineamientos establecidos en la política pública de Movilidad de Cero y Bajas emisiones de la SDM. El último escenario contempló el desmonte total de la circulación del SITP Provisional.

Por último, este apartado presenta en su sección final una discusión sobre la efectividad de las alternativas evaluadas para la reducción de contaminación debidas al tráfico en la ciudad.

4.1 Escenarios de variación de oferta de infraestructura.

Bogotá D.C. en los próximos años llevará a cabo obras de gran impacto que producirán variaciones significativas en las dinámicas del tránsito y la movilidad de la ciudad. Por tanto, como resultado del Contrato Interadministrativo SDM–2020–1903 celebrado entre la Universidad Nacional de Colombia y la SDM se diseñaron alternativas, escenarios de modelación y lineamientos con el fin de representar las condiciones futuras de operación del tráfico en la ciudad y, consecuentemente plantear alternativas de manejo de tránsito para mitigar el impacto en los tiempos de viaje de los diversos actores viales.

La presente investigación inspeccionó, analizó y procesó los resultados de las modelaciones realizadas bajo este contrato para 12 escenarios de operación futura comprendidos entre los años 2021 y 2026. Lo anterior, con el fin de replicar el trabajo expuesto en el capítulo 2 y obtener las emisiones totales para los 6 años. Las 10 obras de gran impacto contempladas en el modelado de los escenarios de tráfico futuro y que a su vez influyen en los resultados de emisión obtenidos para la ciudad en los años venideros se presentan en la Tabla 4-1 y se describen a continuación:

1. Primera Línea de Metro de Bogotá.
2. Traslado anticipado de redes (TAR) de servicios públicos para la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB).
3. RegioTram de Occidente.
4. Troncal Transmilenio Avenida Carrera 68.
5. Troncal Transmilenio Avenida Ciudad de Cali entre Avenida Circunvalar del sur hasta Avenida Manuel Cepeda Vargas.
6. Rehabilitación subtramo acueducto Tibitoc - Casablanca.
7. Puente vehicular de la Avenida Ciudad de Cali (Avenida Carrera 86) con Avenida Alsacia (Av. Calle 12), el cual corresponde al contrato IDU – 1540 -2018.
8. Puente vehicular de la Avenida Boyacá (Avenida Carrera 72) con Avenida Alsacia (Avenida Calle 12).
9. Puente vehicular de la Avenida Ciudad de Cali con Avenida Ferrocarril (Avenida Calle 22).
10. Puente vehicular de la Avenida Boyacá (Avenida Carrera 72) con Avenida Rodrigo Lara Bonilla (Avenida Calle 127).

Es importante aclarar que se estimaron las emisiones de fuentes móviles para los resultados de la modelación del comportamiento del tráfico que se tendría bajo los escenarios hipotéticos de mantener constante la oferta de transporte actual en el horizonte de estudio y la demanda variable en cada uno de los años. De igual forma, se modelaron escenarios con oferta de transporte y demanda variable, con el objetivo de comparar los resultados teniendo

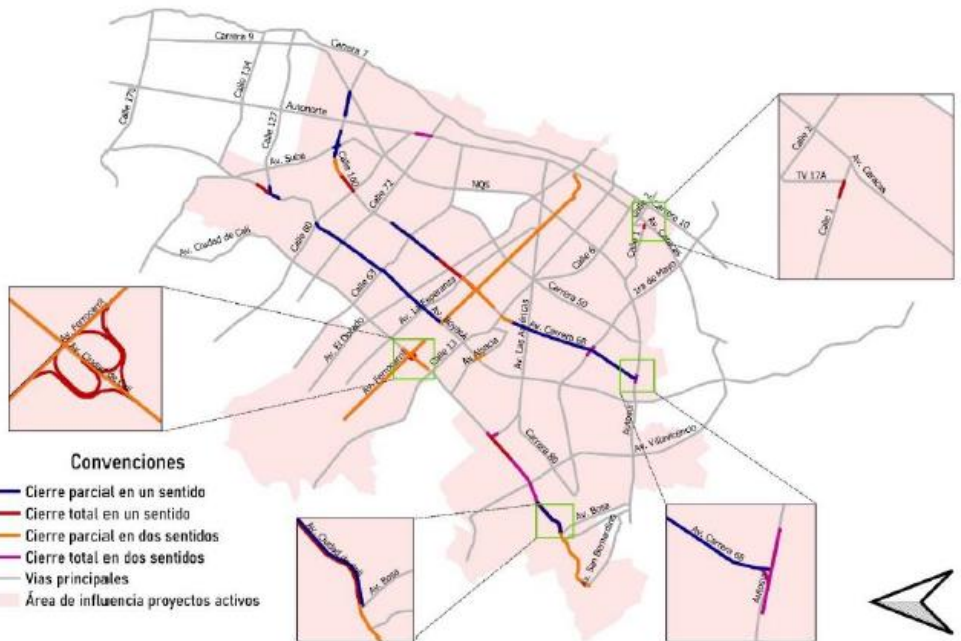
en cuenta el caso hipotético de que no se realizaran las mega obras y el caso actual en que sí se realizan.

Tabla 4-1. Cronograma contemplado para los escenarios modelados.

2021				2022				2023				2024				2025				2026			
T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Rehabilitación Subtramo Tibitoc - Casablanca																							
Puente Av. Ciudad de Cali x Av. Ferrocarril																							
Puente Av. Boyacá x Av. Rodrigo Lara Bonilla																							
Puente Av. Boyacá x Av. Alsacia																							
Puente Av. Cali x Av. Alsacia																							
Troncal Transmilenio Av. Carrera 68																							
Traslado Anticipado de Redes PLMB																							
Primera Línea de Metro de Bogotá																							
Troncal Transmilenio Av. Ciudad de Cali																							
Regiotram de Occidente																							

Fuente: Elaboración propia a partir de Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

Figura 4-2. Corredores intervenidos por obras de gran impacto para 2022



Fuente: Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

En la Figura 4-2 se exponen los corredores afectados por el desarrollo de las obras contempladas en la Tabla 4-1 para el año 2022. Los esquemas de cierres para cada año entre 2021 y 2026 pueden consultarse en el Apéndice D.

Finalmente, es importante aclarar que todos los escenarios modelados que se tuvieron en cuenta contemplaron los ajustes al modelo de la línea base. Específicamente se consideraron los corredores con cierres parciales y totales de calzadas viales según los cortes temporales de cada escenario; se revisaron igualmente restricciones en el comportamiento de tráfico y las modificaciones a las rutas de transporte público por desvíos. Consecuentemente, las emisiones reportadas como resultado del procesamiento de la información obtenida a partir de la macro modelación garantizan de una buena forma la estimación del inventario de contaminación debida a fuentes móviles en ruta en los escenarios de intervención vial por motivo de las obras.

4.1.1 Escenarios Oferta Base – Demanda Futura (2021 – 2026).

En la Tabla 4-2, se presentan los resultados de las emisiones proyectadas para los 5 contaminantes criterio y CO_2 . Estos resultados son producidos por la simulación bajo condiciones proyectadas de demanda de viajes y volumen de tráfico, pero con el supuesto de oferta base constante en todo el período de análisis. Asimismo, es importante tener en cuenta que las emisiones reportadas suponen una distribución tecnológica de la flota vehicular constante en todo el periodo de evaluación.

De igual forma, para replicar los flujos de tráfico obtenidos desde el modelo a las 24 horas a partir de la información estimada en la hora pico del día en cada año de modelación se aplicaron los FHP expuestos en la Tabla 2-4. Las velocidades necesarias para el cálculo del factor de emisión durante todo el día se obtuvieron igualmente al aplicar las curvas VDF, obtener un tiempo de recorrido y relacionarlo con la longitud de cada enlace de la malla vial de la ciudad.

Tabla 4-2. Resultados de emisiones de escenario de infraestructura Oferta Base – Demanda Futura (ton/año)

Año	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
Línea base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
2021	457,111	10,516,998	47,452	1,655	1,293	51,358
2022	528,981	12,832,772	62,132	2,423	1,488	60,614
2023	556,059	13,475,848	65,587	2,595	1,557	64,023
2024	576,666	13,789,296	66,638	2,640	1,604	66,526
2025	597,332	14,096,120	67,545	2,655	1,656	68,855
2026	632,142	14,578,273	69,005	2,728	1,729	73,282

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-3 se exponen las diferencias porcentuales del inventario de emisiones en cada año respecto a los resultados obtenidos para la línea base. En un período de 6 años se presenta un incremento de más del 50% en las emisiones de CO, CO₂, SO₂ y COV. Respecto a las emisiones de PM 2.5 se reporta un incremento de más del 90%.

Tabla 4-3. Diferencias porcentuales de emisiones entre línea base y escenario de infraestructura Oferta Base – Demanda Futura (ton/año)

Año	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
Línea base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
2021	10.87%	9.81%	11.10%	16.80%	7.29%	12.24%
2022	28.30%	33.99%	45.46%	71.02%	23.48%	32.46%
2023	34.87%	40.71%	53.55%	83.19%	29.21%	39.92%
2024	39.87%	43.98%	56.01%	86.35%	33.10%	45.38%
2025	44.88%	47.18%	58.14%	87.40%	37.39%	50.48%
2026	53.32%	52.22%	61.56%	92.55%	43.51%	60.15%

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Escenarios Oferta Futura – Demanda Futura (2021 – 2026).

En la Tabla 4-4, se presentan los resultados de las emisiones proyectadas para los 5 contaminantes criterio y CO₂. Estos resultados son producidos por la simulación bajo condiciones proyectadas de demanda de viajes y volumen de tráfico, pero con el supuesto de oferta futura contemplando las 10 mega obras mencionadas.

Tabla 4-4. Resultados de emisiones de escenario de infraestructura Oferta Futura – Demanda Futura (ton/año)

Año	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2,5}	SO ₂	COV
Línea base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
2021	435,643	9,871,318	42,929	1,431	1,243	48,465
2022	495,664	11,941,140	56,425	2,095	1,416	55,309
2023	510,124	12,451,701	59,676	2,262	1,459	56,944
2024	547,473	13,077,645	62,293	2,385	1,541	61,857
2025	579,306	13,686,206	65,124	2,534	1,614	66,120
2026	619,600	14,262,990	67,152	2,621	1,701	71,365

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-5 se exponen las diferencias porcentuales del inventario de emisiones en cada año respecto a los resultados obtenidos para la línea base. En un período de 6 años se presenta un incremento de más del 50% en las emisiones de CO₂, SO₂ y COV. Respecto a las emisiones de PM 2.5 se reporta un incremento de más del 85%.

En la Figura 4-10, se presenta la comparación de emisiones entre la línea base de operación y el 2026 con oferta de transporte y demanda futuras para PM 2.5.

Tabla 4-5. Diferencias porcentuales de emisiones entre línea base y escenario de infraestructura Oferta Futura – Demanda Futura (ton/año)

Año	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2,5}	SO ₂	COV
Línea base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
2021	3.07%	5.66%	0.51%	1.03%	3.16%	5.92%
2022	24.68%	20.22%	32.10%	47.87%	17.52%	20.87%
2023	30.01%	23.73%	39.71%	59.69%	21.11%	24.45%
2024	36.55%	32.79%	45.84%	68.37%	27.89%	35.18%
2025	42.90%	40.51%	52.47%	78.87%	33.97%	44.50%
2026	48.92%	50.28%	57.22%	85.05%	41.16%	55.96%

Fuente: Elaboración propia

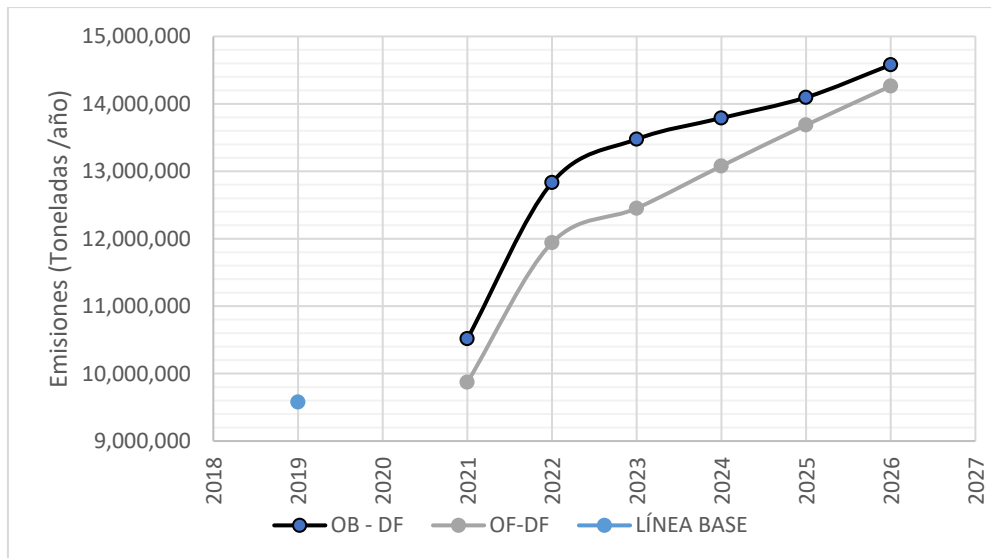
4.1.3 Análisis y comparación de escenarios de infraestructura vial.

La comparación de resultados obtenidos a través de los dos enfoques de trabajo permite inferir que, a pesar de los cierres en tramos específicos de algunos corredores principales e intermedios, la disminución de velocidad de recorrido y el aumento de tiempos de viaje; las emisiones reportadas por el escenario con oferta futura y demanda proyectada son inferiores.

Lo anterior respecto a la contaminación generada en el caso hipotético de no efectuar ninguna obra y permanecer con la misma infraestructura de transporte para servir a la demanda creciente durante los 6 años de análisis.

Aunque pareciera evidente que los cierres viales debidos a las obras de gran impacto deberían producir mayor contaminación respecto a la línea base; acorde con la Figura 4-3, la puesta en funcionamiento de la infraestructura producto de estas obras contribuye con la reducción de las emisiones proyectadas, respecto a las presuntas emisiones provocadas por una oferta de infraestructura base. De igual forma, los 5 contaminantes criterio y el dióxido de carbono presentan su mayor crecimiento de emisión en el 2022, tal y como se refleja en la Figura 4-3.

Figura 4-3. Comparación de emisión de CO_2 escenarios de infraestructura.



Durante 2022 se contempla la ejecución de forma simultánea de las obras de la troncal de Transmilenio de la Avenida Carrera 68, la rehabilitación del Subtramo Tibitoc - Casablanca, el traslado anticipado de redes y obras de la PLMB, la construcción de la troncal de la Avenida Ciudad de Cali, 3 de los 4 puentes nuevos proyectados por la ciudad y las obras asociadas al proyecto Regiotram de Occidente.

De igual forma, para 2022 se presenta una relación volumen capacidad mayor al 75% en la mayoría de los enlaces de la malla vial implicando una alta probabilidad de operación a en

condiciones de alta congestión y baja velocidad promedio de las principales vías arteriales (menor a 20 km/h).

Así mismo, a partir de 2023 la tasa de emisión de todos los contaminantes reduce su tendencia de crecimiento respecto al periodo 2021-2022 (Figura 4-3) debido a la culminación de obras como el puente de la Av. Boyacá con Av. Alsacia, el puente de la Av. Boyacá con Av. Rodrigo Lara Bonilla y el traslado anticipado de redes de la PLMB. La puesta en funcionamiento del puente de la Av. Ciudad de Cali y la Av. Ferrocarril en 2023 también contribuye a la disminución del porcentaje de crecimiento de emisión para este año.

Posterior al 2023, las emisiones crecen de forma lineal hasta el 2026 debido principalmente a las afectaciones, cierres y desvíos por las obras de la troncal de Transmilenio de la Avenida Carrera 68 y la PLMB. El comportamiento de crecimiento de las emisiones para ambos escenarios de proyección expuestos en la Figura 4-3, sugiere que, durante la ejecución de obras de infraestructura, las emisiones totales anuales se incrementan, pero este comportamiento tiende a converger hacia las emisiones que se esperarían en situación hipotética de no haber efectuado ninguna modificación en la oferta de infraestructura de transporte de la ciudad. Lo anterior bajo el supuesto de crecimiento tendencial de la demanda, y sin cambios modales de los usuarios.

Las emisiones reportadas en la presente investigación para 2026 entre el escenario de oferta constante y el escenario con oferta futura contemplada por la ciudad, muestra tan solo una reducción de emisión entre ambos panoramas del 2% para CO , CO_2 y SO_2 , 3% para NO_x y COV y 4% para $PM_{2.5}$. Las curvas de proyección de ambas vertientes de proyección para todos los contaminantes mencionados se presentan en el Anexo D.

4.2 Escenarios de programas de restricción a la circulación vehicular.

El segundo enfoque de planteamiento de escenarios para la reducción de emisiones se centró en evaluar los cambios en las emisiones por la reducción de la actividad vehicular a partir de medidas basadas en la restricción a la circulación de automóviles y motocicletas. Se evaluó una reducción del 50% de los flujos reportados por el modelo de transporte, mediante

el ajuste de los FHP en la etapa de réplica de los volúmenes vehiculares a las 24 horas del día entre las 6 am y las 9 pm, lo cual coincide con la restricción de pico y placa vigente expedida por el Decreto 002 de 2022¹⁴ sin contemplar las exenciones a la restricción.

4.2.1 Restricción a la circulación automóviles (Pico y placa).

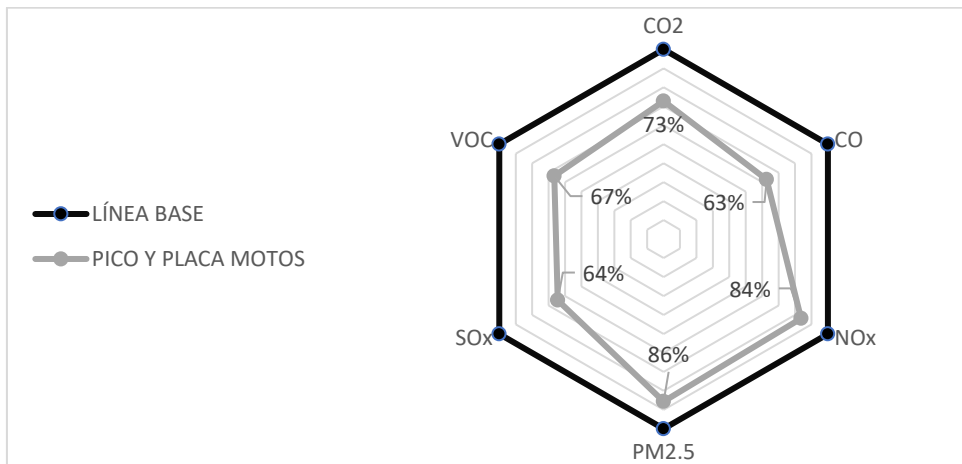
En la Tabla 4-6 y Figura 4-4 se evidencia una reducción en la emisión mayor al 30% para CO , COV y SO_2 en este escenario de modelación. Por otro lado, el CO_2 , NO_x y $PM_{2.5}$, presentan porcentajes de disminución menores, pero igualmente importantes ($> 10\%$). Es importante resaltar que esta simulación no contempló medidas de excepción al programa de pico y placa sino por el contrario se consideró un programa totalmente estricto en la ciudad.

Tabla 4-6. Resultados emisiones escenario pico y placa autos (ton/año)

Escenario	CO	CO_2	NO_x	$PM_{2.5}$	SO_2	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Pico y placa autos	258,599	6,966,250	35,742	1,213	776	30,444
% de diferencia	-37.3%	-27.3%	-16.3%	-14.4%	-35.6%	-33.5%

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4. Comparación de emisión entre línea base y pico y placa de autos.



Fuente: Elaboración propia

¹⁴ Por medio del cual se modifican los artículos 1, 2 y 3 del Decreto Distrital 575 de 2013 “Por medio del cual se dictan disposiciones para el mejor ordenamiento del tránsito de vehículos automotores de servicio particular por las vías públicas en el Distrito Capital, y se derogan los Decretos Distritales 271 y 300 de 2012, y se dictan otras disposiciones.”

4.2.2 Restricción a la circulación motocicletas (Pico y placa).

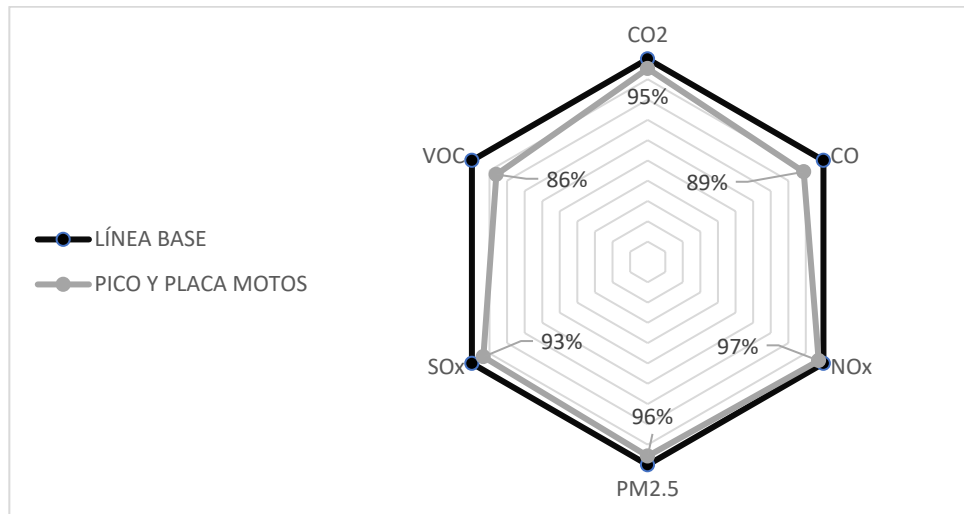
La probabilidad de implementar las condiciones de restricción a la circulación para las motocicletas es cada vez mayor en Bogotá D.C debido al alarmante incremento de esta tipología vehicular en la ciudad. Este escenario demuestra las mayores reducciones para *CO* y *COV* con 11% y 14% respectivamente (Tabla 4-7). Por su parte, las emisiones de *CO₂*, *NO_x* y *PM_{2.5}* no superan un 5% de disminución en las emisiones.

Tabla 4-7. Resultados emisiones escenario pico y placa motos (ton/año)

Escenario	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>PM_{2.5}</i>	<i>SO₂</i>	<i>COV</i>
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Pico y placa motos	366,125	9,121,730	41,553	1,356	1,127	39,414
% de diferencia	-11.2%	-4.8%	-2.7%	-4.3%	-6.5%	-13.9%

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-5. Comparación de emisión entre línea base y pico y placa de motos.



Fuente: Elaboración propia

4.3 Escenarios de chatarrización de flota.

De acuerdo con la Figura 2-18, la flota de vehicular que transita por la malla vial de la ciudad cuenta con un 46% de los camiones grandes y el 38% de los camiones pequeños con una categoría tecnológica pre-euro a diésel. Así mismo, el 31% de los vehículos particulares a gasolina (autos, camionetas y camperos) presenta características pre-euro. Por lo anterior,

la tercera línea de simulación de escenarios se basó en alternativas de chatarrización de esta flota remanente sin estándar en la ciudad.

4.3.1 Chatarrización de camiones.

Este escenario se encuentra soportado por el “Programa de Modernización del Parque Automotor de Carga de más de 20 años” enmarcado en la Resolución 5304 del 24 de octubre de 2019¹⁵; el cual aplica para modelos menores al año 2000 y vehículos con un peso mayor a 10.5 toneladas. Por lo anterior, la simulación efectuada en el desarrollo investigativo únicamente contempló el desmonte de camiones grandes con un modelo inferior al 2000.

Se consideró igualmente un proceso de migración tecnológica en la nueva distribución de la flota reasumiendo el porcentaje de vehículos pre – euro con el estándar más reciente para la ciudad (euro 4). La Tabla 4-8 evidencia reducciones menores al 1% para todos los contaminantes, a excepción del $PM_{2.5}$ con una disminución de 1.67%.

Tabla 4-8. Resultados emisiones escenario de chatarrización camiones (ton/año)

Escenario	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Chatarrización Camiones	412,115	9,572,891	42,292	1,393	1,204	45,633
% de diferencia	-0.04%	-0.05%	-0.99%	-1.67%	-0.10%	-0.27%

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Chatarrización de automóviles.

Este escenario se encuentra soportado por la Ley 1630 de 2013, por medio de la cual se establece una exoneración tributaria sobre el impuesto de vehículos automotores y se dictan otras disposiciones en materia de desintegración física vehicular. Los lineamientos

¹⁵ "Por la cual se reglamenta el procedimiento de registro inicial de vehículos nuevos de servicio público y particular de carga de más 10.500 kilogramos, se determinan las condiciones y se reglamenta el procedimiento para aplicar al "Programa de modernización del parque automotor de carga" y se dictan otras disposiciones"

expedidos por el artículo 1° de esta Ley, consideran beneficios únicamente para los vehículos particulares que corresponden a los modelos 2000 y anteriores.

De igual forma los vehículos a diésel y gasolina tienen una vida útil que puede superar los 300.000 kilómetros y los 200.000 kilómetros respectivamente. De acuerdo con la actividad vehicular reportada en la Tabla 2-5 para los vehículos privados, el parque automotor alcanzaría su edad de jubilación entre los 12 y 17 años, sin embargo, estos límites no se cumplen en la ciudad.

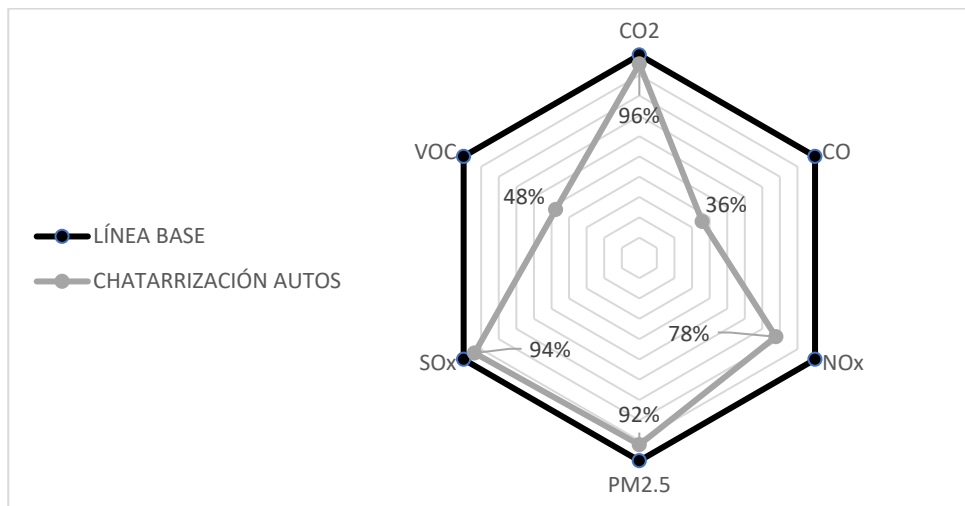
En conformidad con la Tabla 4-9 y la Figura 4-6 esta medida impacta más en el contaminante *CO* con una reducción entre 64.2% y *COV* con una reducción de 52.4%. Cabe aclarar que al igual que el caso anterior se consideró un proceso de migración tecnológica en la nueva distribución tecnológica reasumiendo el porcentaje pre – euro con un estándar euro 4.

Tabla 4-9. Resultados emisiones escenario de chatarrización autos (ton/año)

Escenario	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>NO_x</i>	<i>PM_{2.5}</i>	<i>SO₂</i>	<i>COV</i>
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Chatarrización autos	147,604	9,152,264	33,198	1,304	1,130	21,781
% de diferencia	-64.20%	-4.44%	-22.28%	-7.92%	-6.22%	-52.40%

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-6. Comparación de emisión entre línea base y chatarrización de autos.

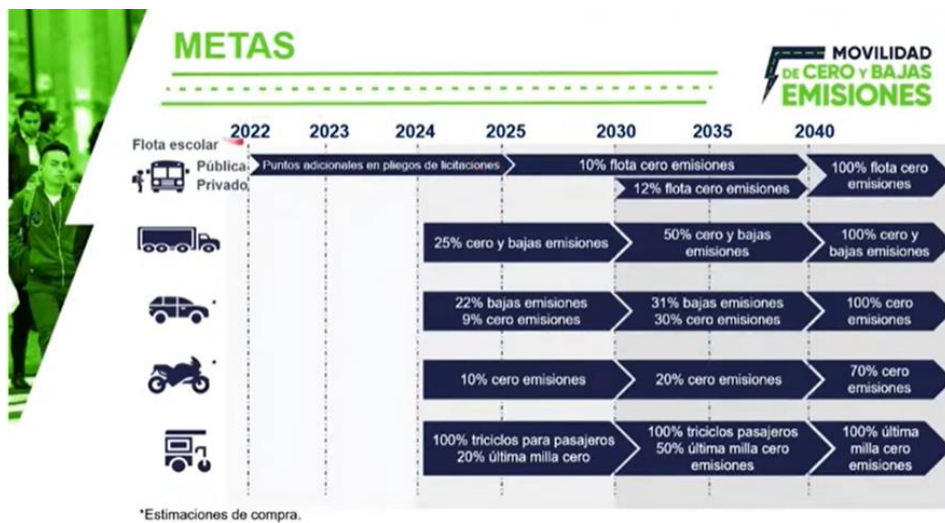


Fuente: Elaboración propia

4.4 Escenarios de tecnología vehicular eléctrica y de bajas emisiones.

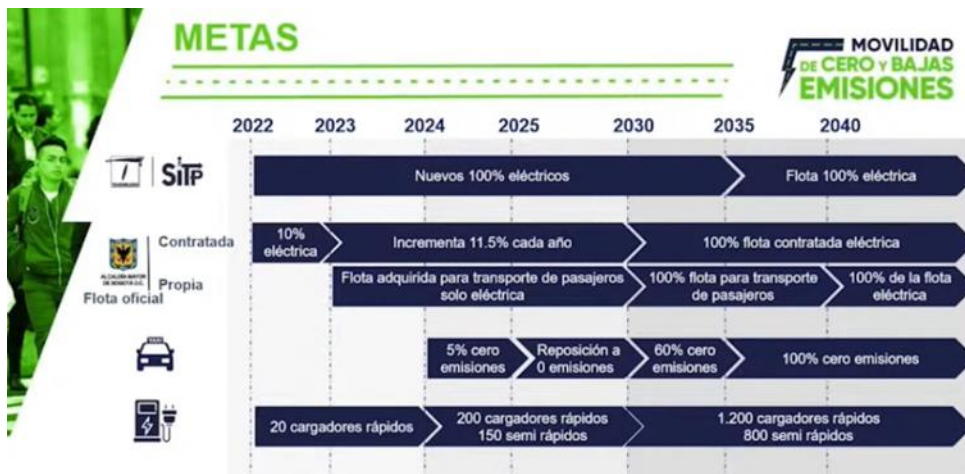
El cuarto grupo de escenarios analizados para la reducción de emisiones se enfocó en la movilidad eléctrica y de bajas emisiones. Con el objetivo de contemplar porcentajes sensatos de implementación de vehículos eléctricos y de bajas emisiones en la ciudad, se seleccionaron los valores resultantes de proyecciones preliminares por parte de la política pública de Movilidad de Cero y Bajas emisiones (Secretaría Distrital de Movilidad, 2021).

Figura 4-7. Programas de electrificación de flota escolar, camiones y motos.



Fuente: Tomado de Secretaría Distrital de Movilidad (2021).

Figura 4-8. Programas de electrificación de flota SITP, oficial y Taxis.



Fuente: Tomado de Secretaría Distrital de Movilidad (2021).

4.4.1 Taxis.

Este escenario se encuentra soportado por la Política Pública de Cero y bajas emisiones relacionada con el Acuerdo Distrital 811 de 2021¹⁶ que toma como punto de referencia el Decreto 677 de 2011¹⁷. Según proyecciones de la entidad se espera que el 5% de los taxis desde 2024 sean eléctricos para alcanzar en el 2035 el 60% de la flota totalmente electrificada (Figura 4-8). Por lo anterior, en esta investigación se simuló la reducción de emisión a partir de una flota de taxis compuesta en un 5% por vehículos eléctricos, dando como resultado disminuciones no mayores al 0.4% en todos los contaminantes evaluados.

Tabla 4-10. Resultados emisiones escenario de taxis eléctricos (ton/año)

Escenario	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Taxis eléctricos	411,332	9,546,023	42,660	1,415	1,200	45,652
% de diferencia	-0.23%	-0.33%	-0.12%	-0.13%	-0.38%	-0.23%

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Transporte Escolar.

De acuerdo con la Figura 4-8 se seleccionó el porcentaje de vehículos de transporte escolar más próximo esperado por la SDM. Los resultados de asumir un 10% de vehículos eléctricos para la flota escolar evidencian reducciones menores al 1% para todos los contaminantes, a excepción del PM_{2.5} con una reducción de 1.4% aproximadamente.

Tabla 4-11. Resultados emisiones escenario de transporte escolar eléctrico (ton/año)

Escenario	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
T. Escolar Eléctrico	411,921	9,538,141	42,359	1,397	1,204	45,668
% de diferencia	-0.09%	-0.41%	-0.83%	-1.36%	-0.08%	-0.20%

Fuente: Elaboración propia.

¹⁶ Por medio del cual se impulsan acciones para enfrentar la emergencia climática y el cumplimiento de los objetivos de descarbonización en Bogotá D.C.

¹⁷ Por medio del cual se adoptan medidas para incentivar el uso del vehículo eléctrico en el Distrito Capital, se autoriza una operación piloto y se dictan otras disposiciones.

4.4.3 Camiones.

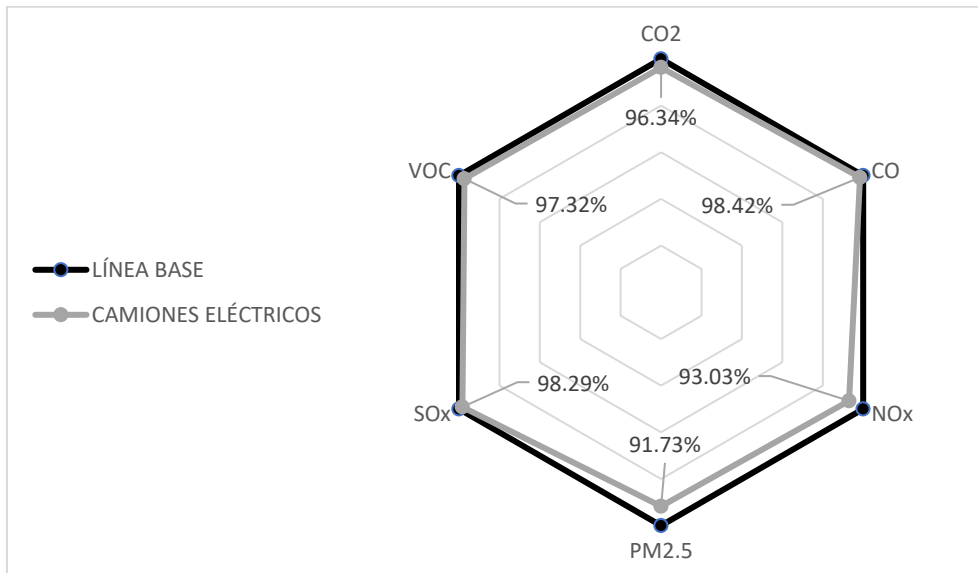
Para este escenario se asumió un porcentaje del 25% de vehículos eléctricos y de bajas emisiones específicamente para los camiones pequeños, es decir para vehículos de carga liviana menor a 10.5 toneladas. La Tabla 4-12 muestra reducciones significativas para las emisiones de NO_x (6.97%) y $PM_{2.5}$ (8.27%); los principales contaminantes emitidos por esta categoría vehicular (Figura 2-21). Las emisiones de CO , SO_2 , COV y CO_2 varían entre 1.58% y 3.66%.

Tabla 4-12. Resultados emisiones escenario de camiones eléctricos (ton/año)

Escenario	CO	CO_2	NO_x	$PM_{2.5}$	SO_2	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Camiones Eléctricos	405,775	9,226,388	39,735	1,299	1,184	44,532
% de diferencia	-1.58%	-3.66%	-6.97%	-8.27%	-1.71%	-2.68%

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-9. Comparación de emisión entre línea base y camiones eléctricos y de bajas emisiones.



Fuente: Elaboración propia

4.4.4 Motos.

La Figura 4-7 muestra que, en la proyección a corto plazo de la Secretaría Distrital de Movilidad, se establece un 10% de motocicletas eléctricas de acuerdo con las estimaciones de compra para los próximos años de esta tipología de vehículo.

Por tanto, para el presente estudio se simuló este porcentaje de motos eléctricas obteniendo la mayor reducción para los contaminantes CO y COV con 2,67% y 3,3% respectivamente (Tabla 4-13). Lo anterior concuerda con los dos contaminantes donde esta categoría vehicular posee mayor participación (Figura 2-21).

Tabla 4-13. Resultados emisiones escenario de motos eléctricas (ton/año)

Escenario	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2,5}	SO ₂	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Motos eléctricas	401,280	9,469,631	42,434	1,402	1,186	44,250
% de diferencia	-2.67%	-1.12%	-0.65%	-1.02%	-1.55%	-3.30%

Fuente: Elaboración propia

4.5 Escenarios de salida de circulación del SITP Provisional.

Desde su estructuración en el Decreto Distrital 319 de 2006¹⁸ la acción pública se orientó a lograr con el SITP un transporte urbano regional integrado, eficiente, competitivo y ambientalmente sostenible. De igual forma, en el marco del Decreto 309 de 2009¹⁹, se adoptó el SITP y se establecieron las acciones para la articulación, vinculación y operación integrada de los diferentes modos de transporte público.

El esquema de rutas del SITP Provisional correspondió a un lineamiento en la fase final del proceso de implementación del sistema, que buscaba organizar con mayores estándares de calidad la flota remanente del transporte público colectivo y garantizar su operación de manera armónica y complementaria con el SITP durante un periodo determinado. El retiro

¹⁸ Por el cual se adopta el Plan Maestro de Movilidad para Bogotá Distrito Capital, que incluye el ordenamiento de estacionamientos, y se dictan otras disposiciones.

¹⁹ Por el cual se adopta el Sistema Integrado de Transporte Público para Bogotá, D.C., y se dictan otras disposiciones.

de rutas de Transporte Público Colectivo (TPC) y la implementación del SITP se desarrolló de manera paulatina desde el 2012.

La culminación del esquema de operación del SITP Provisional se enmarcó en la Resolución 381 de 2019²⁰, donde se autorizó su circulación hasta el 31 de diciembre de 2021. Por lo anterior para este escenario de modelación se asumió el desmonté total del SITP Provisional (135 rutas) y la implementación de estas rutas dentro del SITP implementado con la distribución tecnológica característica proporcionada por Transmilenio S.A; obteniendo una reducción significativa del 9% para $PM_{2.5}$.

Tabla 4-14. Resultados emisiones escenario de desmonte SITP Provisional (ton/año)

Escenario	CO	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	COV
Línea Base	412,296	9,577,326	42,713	1,417	1,205	45,758
Desmonte SITP Provisional	411,542	9,571,845	40,847	1,288	1,202	45,490
% de diferencia	-0.18%	-0.06%	-4.37%	-9.09%	-0.21%	-0.59%

Fuente: Elaboración propia

4.6 Discusión de resultados.

Como es de esperarse las estrategias de gestión de tráfico que estén en la búsqueda de disminuir los flujos vehiculares de las categorías con mayor peso dentro del parque automotor como los automóviles (66%) y las motocicletas (28%) de acuerdo con la Tabla 2-8; tienden a ocasionar disminuciones importantes en las emisiones de contaminación a la atmósfera en la ciudad.

Los programas de restricción a la circulación para motocicletas y vehículos privados (autos, camperos y camionetas) representan en conjunto los escenarios con mayor reducción de emisiones como se evidencia en la Tabla 4-15. Esta variación está fuertemente ligada a la disminución de los niveles de congestión y las relaciones volumen – capacidad de las vías

²⁰ Por medio de la cual se da inicio a la finalización del SITP Provisional, se modifica la Resolución 180 de 2018 y se dictan otras disposiciones.

de Bogotá permitiendo mayores velocidades de operación y consecuentemente menores emisiones.

Por lo anterior, y en relación con los escenarios de oferta de infraestructura futuros, a pesar de la oposición que pueden llegar a generar este tipo de estrategias por parte de los habitantes de la ciudad; los tomadores de decisiones deben buscar su implementación.

Tabla 4-15. Comparación de porcentajes de reducción de escenarios modelados.

CONTAMINANTE	REDUCCIÓN DE EMISIONES (%)								
	RESTRICCIÓN A LA MOVILIDAD		CHATARRIZACIÓN		SITP PROVISIONAL	MOVILIDAD ELÉCTRICA			
	AUTOS	MOTOS	CAMIONES	AUTOS		TRANSPORTE ESCOLAR	TAXIS	CAMIONES	MOTOS
CO ₂	-27.26%	-4.76%	-0.05%	-4.44%	-0.06%	-0.41%	-0.33%	-3.66%	-1.12%
CO	-37.28%	-11.20%	-0.04%	-64.20%	-0.18%	-0.09%	-0.23%	-1.58%	-2.67%
NO _x	-16.32%	-2.72%	-0.99%	-22.28%	-4.37%	-0.83%	-0.12%	-6.97%	-0.65%
PM _{2.5}	-14.39%	-4.31%	-1.67%	-7.92%	-9.09%	-1.36%	-0.13%	-8.27%	-1.02%
SO _x	-35.57%	-6.51%	-0.10%	-6.22%	-0.21%	-0.08%	-0.38%	-1.71%	-1.55%
VOC	-33.47%	-13.86%	-0.27%	-52.40%	-0.59%	-0.20%	-0.23%	-2.68%	-3.30%

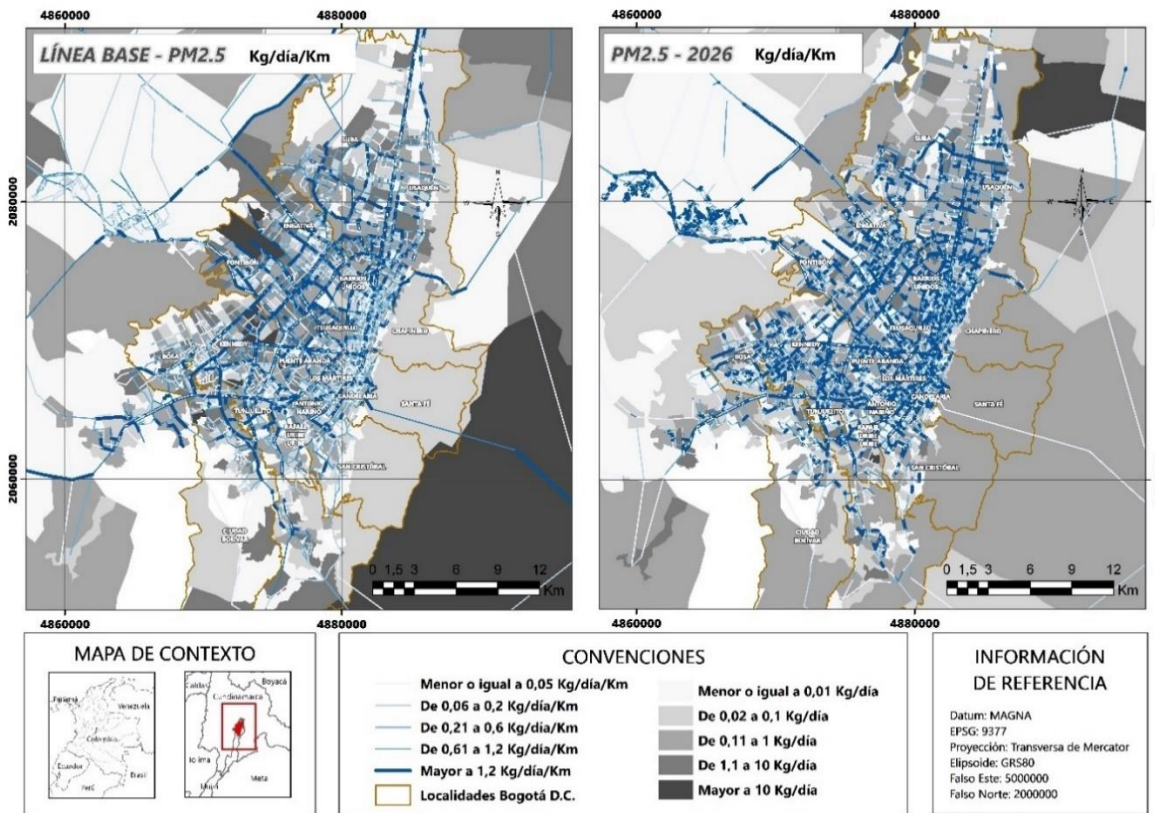
Fuente: Elaboración propia

Para garantizar la efectividad de estos programas a largo plazo, deben llevarse a cabo en conjunto con otras medidas que eviten el incremento en la compra de vehículos por parte de los ciudadanos e incentiven el uso de otros modos de transporte sostenible, con el propósito de prevenir efectos contraproducentes en temas de contaminación. Generar modificaciones a las dinámicas de viaje desde el sistema de actividades permitiría reducir el número de desplazamientos efectuados y contribuirían a mejorar la calidad del aire en la ciudad.

Ahora bien, como se evidenció en la Tabla 4-3 y Tabla 4-5, las obras de gran impacto contempladas para los próximos años más allá de generar una mayor contaminación por los cierres que se efectuarán para su construcción, provocan una reducción de emisiones importantes respecto al hipotético escenario de no ejecutar ninguno de los proyectos mencionados. Lo anterior obedece principalmente a que conforme culmina la fase de construcción de alguna de las 10 obras de gran impacto, el funcionamiento de las mismas tiene efectos positivos para la movilidad en términos de velocidad y congestión.

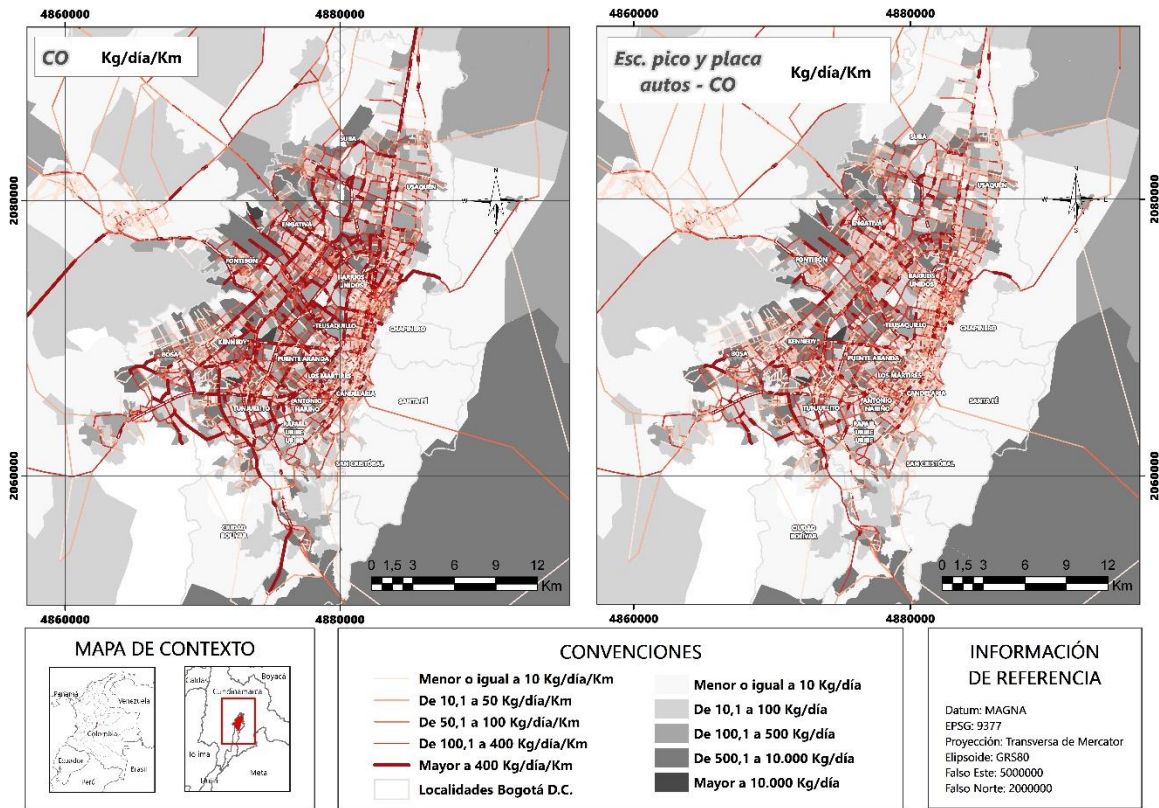
Sin embargo, como se observa en la distribución espacial expuesta en la Figura 4-10, las emisiones mayores a 1.2 kilogramos por día por kilómetro para $PM_{2.5}$ pasan de concentrarse en las vías arteriales de la malla vial en la línea base, a desplazarse hacia la red vial intermedia y las calles locales en 2026. Por tanto, programas de restricción vehicular sensatos pueden contribuir significativamente a la disminución de emisiones como se evidencia en la Figura 4-11.

Figura 4-10. Comparación espacial de emisiones de $PM_{2.5}$ entre 2019 y 2026.



Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

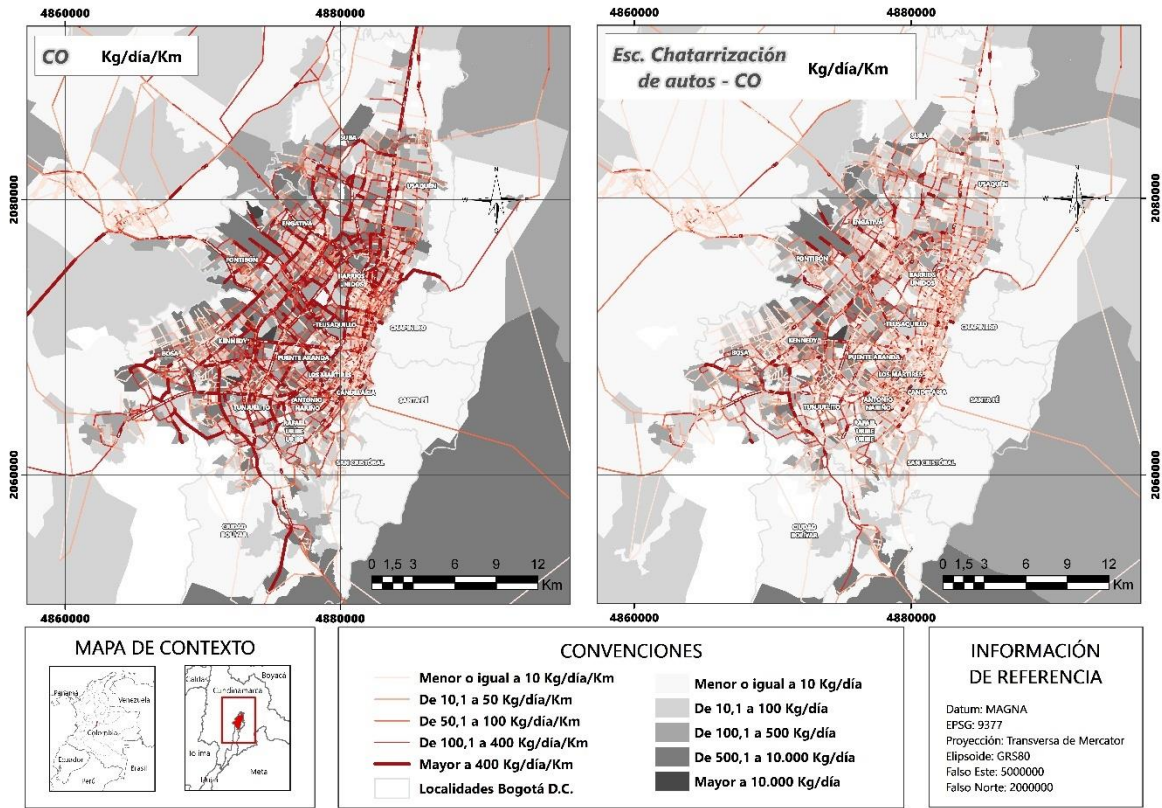
Figura 4-11. Comparación espacial de emisiones de CO entre línea base y escenario de pico y placa en automóviles.



Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

Por otro lado, un escenario con gran reducción de contaminación se presenta en los programas de chatarrización de los vehículos particulares (Tabla 4-15). Como se observa en la Figura 4-12, la distribución de la emisión de monóxido de carbono disminuye los niveles de emisión reportados para la línea base (mayor a 400 kg/día/km), en aproximadamente el 90% de la malla vial arterial al ejecutar planes de renovación tecnológica de vehículos particulares. Por tanto, en aras de disminuir las emisiones por fuentes móviles en Bogotá, la ciudad debe incentivar programas que contribuyan con procesos de renovación tecnológica y chatarrización de automóviles que circulan por el casco urbano sin ningún estándar de emisión, apoyándose en la normativa vigente como la Ley 1630 de 2013.

Figura 4-12. Comparación espacial de emisiones de CO entre línea base y escenario de chatarrización de automóviles.



Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS.

Finalmente, la implementación de la política pública de movilidad de cero y bajas emisiones es un plan ambicioso pero contundente a largo plazo en términos de renovación tecnológica del parque automotor y de disminución de emisiones de fuentes móviles. Esta política en sus objetivos más próximos podría llegar a reducir hasta un 11% de $PM_{2.5}$.

5. Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de esta investigación consistió en la estructuración de un inventario de emisiones por fuentes móviles en ruta y en caliente para una línea base de 2019 en Bogotá D.C. Para esto se implementó un enfoque bottom – up soportado por la estructuración de un código de procesamiento en Python y el procesamiento de los datos de entrada a partir de R estudio y software para la representación gráfica y análisis espacial (QGIS y ArcGIS).

Este establecimiento de los niveles de contaminación requirió de dos grupos fundamentales de información: los factores de emisión extraídos del modelo COPERT V y el factor actividad proporcionado por la actualización del modelo privado de transporte de la ciudad. Información adicional como los registros de la flota vehicular suministrados por el RUNT y Transmilenio S.A., así como, datos de volúmenes de estaciones maestras de la Secretaría Distrital de Movilidad, permitieron desagregar la información lo máximo posible, con el objetivo de representar el comportamiento real del tráfico para 24 horas y la distribución tecnológica propia de los vehículos que circulan por el casco urbano.

Consecuentemente, el inventario fue validado a través de la definición de las emisiones de CO_2 mediante el chequeo del consumo efectivo de combustible, el uso del factor actividad consolidado para grandes categorías vehiculares y las tasas de emisión soportadas por una relación estequiométrica, FE recomendados por la UPME y FE ponderados de COPERT V.

Finalmente, con el inventario definido y validado se modelaron un total de 12 escenarios de variación de oferta de infraestructura para los próximos años y 9 escenarios para la reducción de emisiones enmarcados dentro programas de restricción a la circulación vehicular, chatarrización de flota, tecnología eléctrica y desmonte del SITP Provisional. Estas simulaciones proporcionan un punto de referencia para sentar prioridades en los planes y estrategias para mejorar la calidad del aire en los próximos años en Bogotá.

Este capítulo fija las conclusiones y recomendaciones en cinco apartados principales: conclusiones, pregunta de investigación e hipótesis, discusión, limitaciones de la investigación y futuras investigaciones.

5.1 Conclusiones

La implementación del enfoque bottom – up para este inventario, a partir de información de actividad vehicular suministrada por un modelo de transporte actualizado, representa el segundo estudio de esta tipología en la línea de tiempo de la ciudad. El primer inventario de emisiones estimado a partir de un proceso de macro modelación, donde se describen con precisión los patrones de viaje y comportamiento del tráfico se estableció para 2015 (Mangones, 2017).

Esta investigación aporta a la ciudad un inventario cuatro años más reciente respecto al principal punto de referencia de este estudio; donde a su vez, se consideraron datos del factor actividad más precisos debido al fuerte proceso de calibración del macromodelo. El uso de las salidas del modelo privado de transporte garantiza un mejor nivel de estimación de emisiones respecto a otros enfoques de investigación, y por supuesto, frente a metodologías Top – Down previniendo de esta forma la subestimación o sobrestimación de estas.

En concordancia con lo anterior, se definieron un total de 295 funciones de emisión para cada contaminante contemplado, a partir de la base de aproximadamente 29,000 ecuaciones de COPERT V. La selección de estas funciones de emisión a partir de parámetros como la ocupación, la pendiente promedio de las vías y la distribución tecnológica, permitió la apropiada introducción de la velocidad promedio de recorrido para cada hora del día en la ciudad y, así estimar factores de emisión apropiados y adaptados a las condiciones de operación de tráfico en Bogotá.

Los resultados reportados permiten deducir que los vehículos livianos (autos, camionetas y camperos) son los que más aportan a las emisiones en la ciudad. Esta categoría vehicular contribuye con más del 70 % de emisiones de CO y SO_2 y, más del 50% de la emisión de COV y CO_2 . En cuanto a las motocicletas, otro de los vehículos fuertemente utilizado en la

ciudad, contribuyen significativamente a las emisiones de CO (23%) y COV (29%). Por otro lado, el contaminante criterio más peligroso en términos de salud pública, debido a su intrínseca relación con enfermedades cardiovasculares y respiratorias ($PM_{2.5}$), es producido mayoritariamente por los buses SITP e intermunicipal con 26% y camiones con 28%.

Desde otra perspectiva de análisis, el consumo de diésel representa el 56% de las emisiones de NO_x y el 82% de emisiones de $PM_{2.5}$, mientras que, el 92% de COV y más del 97% de las emisiones de SO_2 y CO_2 , corresponden a los vehículos a gasolina.

Por otro lado, respecto a la distribución espacial se resalta que las emisiones se concentran en el área occidental de la ciudad y disminuyen conforme se avanza hacia el oriente. En particular, para el caso del $PM_{2.5}$ que requiere especial atención por provocar efectos nocivos en la salud, se tiene una emisión diaria de más de 200kg/día/km en las vías arteriales de la ciudad. Igualmente, para esta tipología vial, se emiten más de 8,000 kg/día/km de CO_2 , más de 40 kg/día/km de NO_x , más de 1,2 kg/día/km de $PM_{2.5}$, más de 1 kg/día/km de SO_2 y más de 40 kg/día/km de COV .

El proceso de validación de las emisiones reportadas a partir de las cifras de consumo efectivo de combustible debido a los flujos de vehículos proporcionó tan solo una diferencia del 5.4% en la emisión de CO_2 , lo que es razonablemente cercano a la estimación reportada bajo el enfoque Bottom-Up adoptado y, justificable debido a la migración de la flota vehicular a tecnologías de emisión más actualizadas.

Los vehículos privados pre-euro y euro 1 a gasolina redujeron su porcentaje de participación en el presente estudio en 5% y 18% respectivamente, para dar paso a un mayor número de vehículos euro 3 (18%) y euro 4 (5%). Esto sugiere una reducción razonable en proporción de emisiones para todos los contaminantes, al ser los automóviles, camperos y camionetas la categoría vehicular con mayor participación en todas las emisiones a excepción del $PM_{2.5}$.

Respecto a las variaciones obtenidas frente al anterior estudio que utilizó un modelo de transporte bajo un enfoque Bottom - Up, se evidencia entre otros, una disminución de 4.9% de emisiones de CO y una reducción significativa de 17% para COV en los 4 años de disparidad entre los estudios. Esto obedece principalmente a la sensibilidad de los factores

de emisión ante las velocidades promedio utilizadas para cada hora del día respecto a los estudios previos. En esta investigación se respetaron los límites de velocidad para los cuales se calibraron las funciones de COPERT V.

Ahora bien, aunque pareciera evidente para los próximos años, que los cierres viales debidos a las obras de gran impacto deberían producir mayor contaminación respecto a la línea base; el presente estudio sugiere que la puesta en funcionamiento de la infraestructura producto de estas obras, contribuye con la reducción de las emisiones proyectadas, respecto a las presuntas emisiones provocadas por una oferta de infraestructura base continua (escenario de no implementar ninguna obra).

El comportamiento a largo plazo del crecimiento de las emisiones para ambos escenarios de proyección, indica que a pesar de la implementación de obras de infraestructura que mejoren la movilidad de los ciudadanos, las emisiones totales anuales tienden a converger a la situación hipotética de no haber efectuado ninguna modificación en la oferta de infraestructura de transporte de la ciudad. Las emisiones reportadas para 2026 entre el escenario de oferta constante y el escenario con oferta futura contemplada por la ciudad, muestra tan solo una reducción de emisión entre ambos panoramas del 2% para CO , CO_2 y SO_2 , 3% para NOX y COV y, 4% para $PM_{2,5}$

Finalmente, entre los escenarios de reducción de emisiones se evidencia que los programas de restricción a la circulación para motocicletas y vehículos privados (autos, camperos y camionetas) representan en conjunto los escenarios con mayor disminución. Esta variación está fuertemente ligada a la disminución de los niveles de congestión y las relaciones volumen – capacidad de las vías de Bogotá permitiendo mayores velocidades de operación y consecuentemente menores emisiones.

Por último, esta investigación muestra que un escenario con gran reducción de contaminación se presenta en los programas de chatarrización de los vehículos particulares. Para esta simulación la emisión de monóxido de carbono disminuye sus niveles de emisión reportados para la línea base (mayor a 400 kg/día/km), en aproximadamente el 90% de la malla vial arterial al ejecutar planes de renovación tecnológica de vehículos particulares.

5.2 Pregunta de investigación e hipótesis.

En relación con la pregunta de investigación y la hipótesis, se estableció posterior a la actualización del inventario de emisiones y la ejecución del análisis de escenarios, que los cambios sobre las variables de la oferta del sistema de transporte pueden reducir un 15% o más, las emisiones de fuentes móviles en Bogotá.

Fundamentalmente, el programa de restricción a la movilidad para autos (pico y placa) sin considerar ningún tipo de exención a la medida, puede garantizar reducciones mayores al 15% para todos los contaminantes criterio a excepción del $PM_{2.5}$ (14%); panorama congruente con los porcentajes de participación de la emisión de este contaminante para esta categoría vehicular (17%).

Sin embargo, al implementar la anterior medida con una estrategia equivalente para las motocicletas en la ciudad, se alcanzaría un porcentaje de reducción de 19% aproximadamente para este contaminante criterio de especial atención.

De igual forma, es importante resaltar que poner en marcha únicamente programas de movilidad eléctrica y de bajas emisiones en categorías como el transporte escolar, los taxis, los camiones, las motocicletas y el transporte público, no repercuten en disminuciones mayores al 11% en el corto plazo. En concordancia, si se omite el programa de camiones eléctricos y de bajas emisiones, por su probable difícil ejecución por el costo de intervención, se obtendría tan solo reducciones de 4% aproximadamente en los años venideros.

En conclusión, estrategias alineadas en la gestión de calidad del aire deben influenciar obligatoriamente a los vehículos particulares (autos, camionetas y camperos), si se quieren alcanzar reducciones en los niveles de contaminación mayores al 15% en Bogotá. Estrategias de chatarrización de automóviles enfocadas a disminuir el porcentaje de vehículos pre – euro que circulan en el área urbana pueden contribuir con reducciones de más del 50% para el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles.

Así mismo, es válido e importante afirmar que, al simular el escenario de desmonte del SITP provisional, se reducen de entrada un 4% de las emisiones de NO_x y un 9% de las emisiones de $PM_{2.5}$ reportadas en el capítulo 4 desde el año 2022; por lo cual, los porcentajes de disminución estimados en la presente investigación para estos dos contaminantes deben ser revaluados en el futuro bajo esta nueva condición de operación en el Sistema Integrado de Transporte Público en la ciudad.

5.3 Limitaciones de la investigación.

Las limitaciones en el desarrollo de la investigación se enfocaron principalmente en tres puntos; la información del parque automotor, los factores de emisión y el factor de actividad intrazonal a nivel de ZAT.

Debido a la ausencia en las bases de datos del Registro Nacional Único de Tránsito (RUNT), de variables como la tipología del motor y sobre todo el estándar de emisión (normativa euro) a nivel vehículo; se definieron supuestos importantes a partir de estudios previos y la normatividad vigente a nivel nacional y distrital. Sin embargo, al no contar con estas variables para realizar la discriminación necesaria, se imprime incertidumbre en la distribución tecnológica exacta de la flota vehicular que circula en Bogotá, a excepción de la flota de transporte público (SITP) que fue posible discriminar con exactitud a partir de la data proporcionada por Transmilenio S.A.

En segundo lugar, los factores de emisión extraídos del modelo de COPERT V, a pesar de ser adaptados lo más fielmente posible a las condiciones de operación y parque automotor de la ciudad; fueron calibrados para comportamientos de tráfico en el continente europeo. Por lo anterior, en el presente estudio fue necesario utilizar los límites de uso en términos de velocidad de las funciones de emisión proporcionadas para establecer el inventario de emisiones.

Estos dos aspectos deben fomentar y ahondar esfuerzos por parte del distrito con el fin de consolidar bases de datos precisas y actualizadas que permitan evitar supuestos que conlleven a cifras irreales de contaminación en la ciudad. Factores de emisión medidos

directamente para Bogotá para estimar adecuadamente los niveles de contaminación según el tipo de contaminante, el tipo de combustible, los patrones de conducción, la categoría vehicular, el tipo de carretera y la hora del día; son esenciales para investigaciones futuras en la ciudad.

Por último, la tercera limitación estuvo relacionada con la actividad vehicular de las calles locales, puesto que a partir del modelo de macrosimulación de transporte se obtuvo únicamente información de flujos a partir de la relación conector – centroide. No obstante, esta situación no fue impedimento para definir el factor actividad a nivel de ZAT, puesto que se efectuó la estimación mediante la equivalencia entre el número de conectores y la longitud real de malla vial dentro de cada Zona de Análisis de Transporte.

5.4 Futuras investigaciones.

Finalmente, el presente estudio ha evidenciado que los modelos de transporte a nivel macro y meso son una herramienta que brinda buenas aproximaciones del factor actividad para el cálculo de emisiones contaminantes por fuentes móviles. Por tanto, se debe incentivar su uso en futuras investigaciones con el fin de contemplar el conjunto de condiciones de movilidad de un área en específico con la menor cantidad posible de supuestos generales.

Los modelos de transporte intrínsecamente representan las dinámicas de movilidad y no solo valores aislados y localizados de parámetros macroscópicos de tránsito como volúmenes y velocidades. Generalmente su calibración está soportada con fuertes trabajos de muestreo y análisis como las encuestas de movilidad; información que igualmente debe ser contemplada para el establecimiento de inventarios de contaminación.

De igual forma, próximos estudios que centren sus esfuerzos en el uso de modelos de transporte para la estimación de emisiones, deberán apoyarse en la ingeniería de tránsito con el fin de suplir las limitaciones presentadas a nivel macro. Efectuar micros simulaciones a nivel intersección o tramo dentro de las Zonas de Análisis de Transporte, brindará un mayor nivel de confianza en la estimación del factor de actividad a nivel de malla vial local.

Futuras investigaciones a su vez deben propender por el uso de factores de emisión medidos directamente para Bogotá o en su defecto a nivel nacional. En caso contrario, los futuros estudios deberán en la medida de lo posible ahondar esfuerzos en el establecimiento de inventarios comparando el uso de los factores de emisión proporcionados por los diferentes modelos de emisión frecuentemente usados para la estimación de estas emisiones.

6. Referencias

- AMVA. (2018). Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá- Año 2016. *Área Metropolitana Del Valle de Aburrá*, 50. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario_FuentesMóviles2016.pdf
- Andrade, G. I., Remolina, F., & Wiesner, D. (2013). *Assembling the pieces: a framework for the integration of multi-functional ecological main structure in the emerging urban region of Bogotá, Colombia*. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0292-5>
- Barbera, E., Currò, C., & Valenti, G. (2010). A hyperbolic model for the effects of urbanization on air pollution. *Applied Mathematical Modelling*, 34(8), 2192–2202. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.10.030>
- Beltran, D., Belalcazar, L. C., & Rojas, N. (2012). Spatial distribution of non-exhaust particulate matter emissions from road traffic for the city of Bogota – Colombia. *2012 International Emission Inventory Conference “Emission Inventories - Meeting the Challenges Posed by Emerging Global, National, Regional and Local Air Quality Issues,” 1*. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei20/index.html>
- Behrentz, E., Sánchez, N., & Rivera, J. (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá*. (pp. 1–46). Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Fuentes Móviles. Universidad de Los Andes. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA).
- Bogotá Cómo Vamos. (2019). *Estudio de Percepción ciudadana 2019*. 1–108. Fundación Corona. El tiempo. Pontificia Universidad Javeriana. Cámara de Comercio de Bogotá. <https://bogotacomovamos.org/encuesta-de-percepcion-ciudadana-2019/>
- Carmona Aparicio, L. G., Rincón Pérez, M. A., Castillo Robles, A. M., Galvis Remolina, B. R., Sáenz Pulido, H. E., Manrique Forero, R. A., & Pachón Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Tecnura*, 20(49), 59–74. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>

- Cheewaphongphan, P., Chatani, S., & Saigusa, N. (2019). Exploring Gaps between Bottom-Up and Top-Down Emission Estimates Based on Uncertainties in Multiple Emission Inventories: A Case Study on CH₄ Emissions in China. *Sustainability*, 11(7), 2054. <https://doi.org/10.3390/su11072054>
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. (CONAMA). (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes.*,146. Gobierno de Chile. Financiado por: Banco Mundial y Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional. http://www.declaracionemision.cl/docs/GUIA_CONAMA.pdf
- DAMA. (2006). Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia. Programa de Autorregulación ambiental. <http://www.dama.gov.co/dama/libreria/php/decide.php?patron=00>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://geoapps.esri.co/censo2018/index.html>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). CONPES 3943. Política para el mejoramiento de la calidad del aire. *Dnp*, 1–79. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3943.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia 2015*. 45. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoración económica de la degradación ambiental.pdf>
- Dora, C., Hosking, J., Mudu, P., & Fletcher, E. R. (2011). Urban Transport and Health. *Sustainable Transport: Sourcebook for Policy Makers in Developing Cities*, 60. World Health Organization. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241502443>
- European Environment Agency, (EEA). (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories. *EEA Technical Report, 12/2019*. <https://doi.org/doi:10.2800/293657>
- European Environment Agency, (EEA). (2021). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles) 1–144. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Fedesarrollo, & PROBOGOTA. (2019). *Informe Bogotá Región, calidad del aire*. 30. Centro de Investigación Económica y Social. Fundación para el progreso de la

- Región Capital <http://asogravas.org/wp-content/uploads/2019/12/Informe-Bogotá-Región-Calidad-del-Aire.pdf>
- Festus, I. A., Omoboye, I. F., & Andrew, O. B. (2020). Urban Sprawl : Environmental Consequence of Rapid Urban Expansion. *Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities (MJSSH)*, 5(6), 110–118.
<https://msocialsciences.com/index.php/mjssh/article/view/411>
- Gaitán Varón, M., & Cárdenas Ruiz, P. A. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de emisiones atmosféricas*, 92. Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Gobierno de Colombia. Bogotá, Colombia. ISBN: 978-958-8901-64-0.
- Giraldo, L. A., & Behrentz, E. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. 1*. Universidad de los Andes. Bogotá [https://bogota.gov.co/sites/default/files/inline-files/inventario de emisiones fuentes moviles.pdf](https://bogota.gov.co/sites/default/files/inline-files/inventario%20de%20emisiones%20fuentes%20moviles.pdf)
- Greenpeace. (2020). La contaminación del aire en Bogotá provocó 3900 muertes en lo que va del año. 23 de septiembre de 2020.
<https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/uncategorized/la-contaminacion-del-aire-en-bogota-provoco-3900-muertes-en-lo-que-va-del-ano/>
- Guevara, M., Tena, C., Soret, A., Serradell, K., Guzmán, D., Retama, A., & Camacho, P. (2017). Science of the Total Environment An emission processing system for air quality modelling in the Mexico City metropolitan area: Evaluation and comparison of the MOBILE6 . 2-Mexico and MOVES-Mexico traffic emissions. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.135>
- Gulia, S., Shiva Nagendra, S. M., Khare, M., & Khanna, I. (2015). Urban air quality management-A review. *Atmospheric Pollution Research*, 6(2), 286–304.
<https://doi.org/10.5094/APR.2015.033>
- Guzmán Ramos, L. E. (2014). *PROYECCIÓN DE EMISIONES VEHICULARES EN BOGOTÁ D. C., A 2050 USANDO COMO AÑO BASE EL AÑO 2008*. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53544>
- Han, J., Hayashi, Y., Cao, X., & Imura, H. (2009). Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 91(3), 133–141.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.12.002>
- Health Effects Institute, (HEI). (2020). *A special report on global exposure to air pollution and its health impacts* (pp. 1–28). State of Global Air 2020. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute. <https://www.stateofglobalair.org/>

- Instituto Nacional de Salud. (2018). *Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia*. [https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10 Carga de enfermedad ambiental en Colombia.pdf](https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf)
- Jaikumar, R., Nagendra, S. M. S., & Sivanandan, R. (2017). Modal analysis of real-time, real world vehicular exhaust emissions under heterogeneous traffic conditions. *Transportation Research Part D*, 54, 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.015>
- Jaime Vásquez, David Felipe (2022), “Factores de emisión - Inventario de emisiones de fuentes móviles bajo metodología Bottom - Up para Bogotá, Colombia y análisis de escenarios de oferta para su reducción”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/dd6pbr927j.1 <https://data.mendeley.com/datasets/dd6pbr927j/1>
- Krecl, P., Targino, A. C., Landi, T. P., & Ketzler, M. (2018). AC SC. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.042>
- Lents, J.; Walsh, M.; He, K.; Davis, N.; Osses, M.; Tolvett, S. y Hu, L. (2011). Handbook of air quality management. www.aqbook.org
- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., & Münzel, T. (2019). Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal*, 40(20), 1590–1596. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>
- Linton, C., Grant-muller, S., & Gale, W. F. (2015). *Transport Reviews: A Transnational Approaches and Techniques for Modelling CO 2 Emissions from Road Transport*. May, 37–41. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1030004>
- Li, F., Zhuang, J., Cheng, X., Li, M., Wang, J., & Yan, Z. (2019). *Investigation and Prediction of Heavy-Duty Diesel Passenger Bus Emissions in Hainan Using a COPERT Model*. <https://doi.org/10.3390/atmos10030106>
- Li, Y., Zheng, J., Dong, S., Wen, X., & Jin, X. (2019). *Temporal variations of local traffic CO 2 emissions and its relationship with CO 2 flux in Beijing, China*. 67 (November 2018), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.007>
- Mangones, S. C. (2017). Impacts on Safety and Air Pollution From Transportation Policies in Bogotá, Colombia. *Dissertations*, 157. Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA <http://repository.cmu.edu/dissertations/953>
- Mangones, S. C., Jaramillo, P., Fischbeck, P., & Rojas, N. Y. (2019). Development of a high-resolution traffic emission model: Lessons and key insights from the case of Bogota. *Environmental Pollution*, 253, 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.008>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - EVA - Función Pública. *Diario Oficial No. 49.523 de 26 de Mayo de 2015*, 1–920.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Miranda, R. M., Pe, P. J., Nogueira, T., Guardani, M. L., Fornaro, A., Ynoue, R., & Andrade, M. F. (2014). *Emission factors of air pollutants from vehicles measured in São Paulo : case study comparison inside road tunnels in São Paulo*. *Cetesb 2013*.
<https://doi.org/10.1007/s13762-014-0562-7>
- Organización de Naciones Unidas (ONU). (2018). Las ciudades del mundo en 2018. Organización de Naciones Unidas. Nueva York. Estados Unidos.
<https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Ortiz, E., & Rojas, N. (2013). *Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM 10 en Bogotá*. *15*(1), 90–102.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/72582>
- Pachón, J. E. (2014). Informe Técnico Y Financiero Del Contrato 1467 De 2013 “Desarrollo E Implementación De Un Modelo De Calidad Del Aire Para Bogotá” Celebrado Entre La Secretaría Distrital De Ambiente Y La Universidad De La Salle. 1–52.
- Peñaloza, N. E. (2010). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL INVENTARIO DE EMISIONES PROVENIENTES DE LAS FUENTES MÓVILES Y FIJAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, D.C. *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental*.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7516>
- PROMIGAS. (2020). *Informe del Sector Gas Natural Contenido*. Cifras 2019.
<http://52.247.87.160:52345/Documents/InformedelSectorGasNaturalenColombia2020.pdf>
- Puliafito, S. E., Allende, D., Pinto, S., & Castasana, P. (2015). *High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina*. *101*, 303–311.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.040>
- Pulido Castillo, R. A., Acosta Zapata, A. F., & Sánchez Muñoz, M. del Pi. (2017). Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público Masivo de Bogotá. *Revista Chilena de Economía y Sociedad*, *11*(2), 15. <https://rches.utem.cl/articulos/536-2/%0Ahttps://rches.utem.cl/articulos/536-2/#rendimiento-del-combustible-de-la-flota>
- Ramirez, J., Pachon, J., Casas, O., & González, S. (2019). ON-ROAD VEHICLE EMISSION FACTORS FOR COLOMBIA: A CASE STUDY OF BOGOTA. *9*(June), 73–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.29047/01225383.154>

-
- Reis, S., Blank, P., Friedrich, R., Smiatek, G., José, R. S., Peña, J. I., Pérez, J. L., González, R. M., Lewyckyj, N., Colles, A., Janssen, L., Mensink, C., Reis, S., Blank, P., Wickert, B., Friedrich, R., Müezzino\uglu, A., Elbir, T., Dinçer, F., ... Seyfioglu, R. (2004). Emission Models and Tools. In R. Friedrich & S. Reis (Eds.), *Emissions of Air Pollutants: Measurements, Calculations and Uncertainties* (pp. 279–335). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07015-4_4
- Rodríguez, P. A., & Behrentz, E. (2009). *Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/10957>
- Rojas Perez, A. (2015). *Estimacion de emisiones contaminantes provenientes de fuentes moviles en la jurisdiccion CAR*. 120. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/52666/7/AuraRojas.2015.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/52666/>
- Secretaría Distrital de Ambiente, (SDA). (2010). *Plan decenal de descontaminación del aire de Bogotá*. http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groTOPIId=55886
- Secretaría Distrital de Ambiente, (SDA). (2021). *Inventario de emisiones de Bogotá. Contaminantes atmosféricos*. <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/397082/Inventario+de+Emisiones+de+Bogota+portal+nuevo.pdf/972994eb-7f58-42c2-a801-0f8579937919>
- Secretaria Distrital de Movilidad. (2015). *Movilidad en cifras 2015*. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2019). *Caracterización de la movilidad - Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019*. Preparado por: Unión Temporal Steer Davies & Gleave & Davis– Centro Nacional de Consultoría. <https://www.simur.gov.co/encuestas-de-movilidad>
- Secretaría Distrital de Movilidad, (SDM). (2021). *Política Pública de Movilidad de Cero y Bajas emisiones*. 22 de septiembre. https://www.youtube.com/watch?v=BF7ohLDqo14&ab_channel=ANDEMOS
https://www.movilidadbogota.gov.co/web/entorno/Funciones_deberes#menu6
- Secretaría Distrital de Movilidad, (SDM), & Universidad Nacional de Colombia, (UNAL). (2021). *Dos escenarios de línea base para el año 2020 Re-calibrado* (p. 71). Entregable 3. Contrato 2020 – 193. TRANSLOGYT. Bogotá D.C.

- Shafabakhsh, G., Taghizadeh, S. A., & Kooshki, S. M. (2017). *Investigation and sensitivity analysis of air pollution caused by road transportation at signalized intersections using IVE model in Iran*. 1–13.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12544-017-0275-3>
- SICOM. (2021). *Boletín estadístico. Estaciones de Servicio Automotriz y fluvial*. Sistema de Información de Comercialización de Combustible. Ministerio de Minas y Energía.
<https://www.sicom.gov.co/index.php/boletin-estadistico>
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZmRhZDFiYTUtOWMzNS00NzNmLTk2YzUtOTljZjYxN2FjIiwidCI6ImM5ODBiNDUwLTBiNWwtNDhiYy1iZDFhLTU0OTFjYWJjODRiYyIsImMiOiR9>
- Taylor, P., Corvaian, R. M., Urrutia, C. M., Corvalán, R. M., & Urrutia, C. M. (2011). *Emission Factors for Gasoline Light-Duty Vehicles : Experimental Program in Santiago , Chile*. *Emission Factors for Gasoline Light-Duty Vehicles : Experimental Program in Santiago , Chile*. October 2014, 37–41.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464238>
- Thapa, R. B., & Murayama, Y. (2010). Drivers of urban growth in the Kathmandu valley, Nepal: Examining the efficacy of the analytic hierarchy process. *Applied Geography*, 30(1), 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.10.002>
- Trejos Zapata, E. (2021). Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – año base 2017). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>
- UPME. (2019). *Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética Resumen Ejecutivo BEU Sector Transporte*. 40.
https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Paginas/estudio-primer-balance-energia-util-para-Colombia.aspx%0Ahttps://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf
- Vargas, F. A., Rojas, N. Y., Pachon, J. E., & Russell, A. G. (2012). PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. *Atmospheric Pollution Research*, 3(1), 72–80. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.006>
- Velasco, E., & Bernabe, R. (2004). *Biogenic Emissions: Emissions of volatile organic compounds no methane from vegetation and nitric oxide from soil (in Spanish)*. . Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). 2004. 94 p. ISBN: 968-817-699-0.

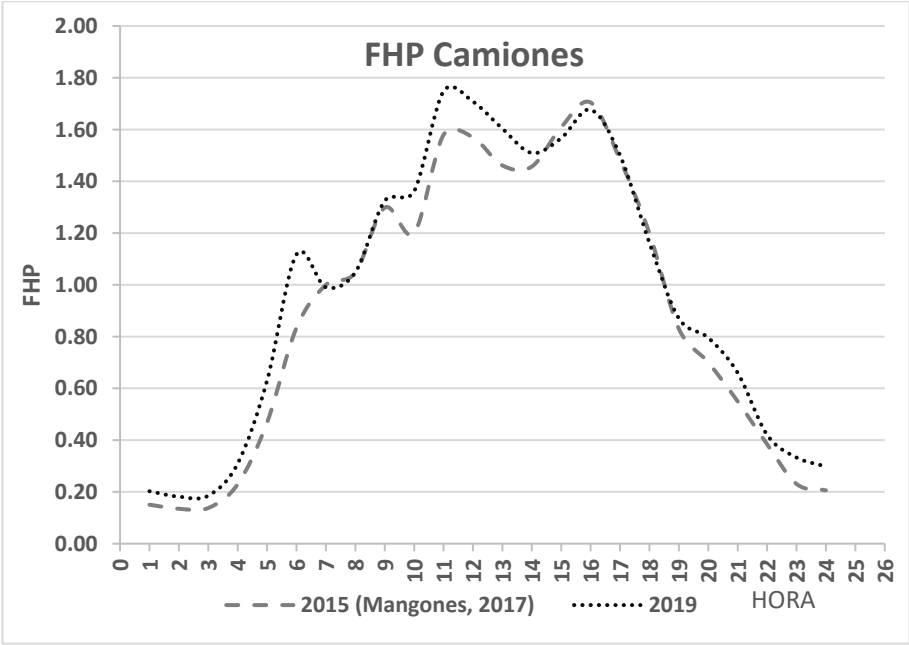
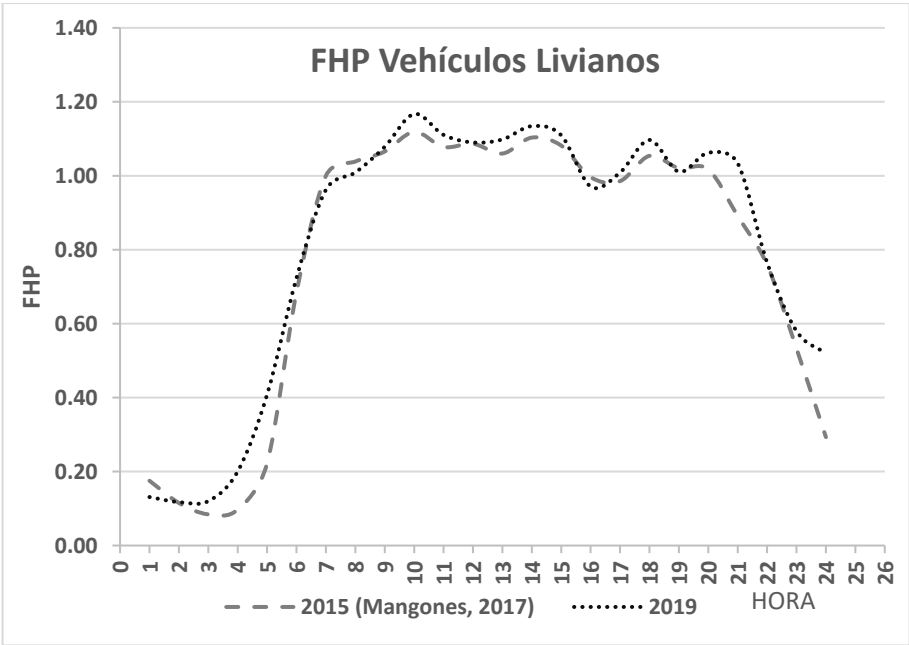
Wang, H., Fu, L., Zhou, Y., Du, X., & Ge, W. (2010). Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005. *Environmental Pollution*, 158(2), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.09.002>

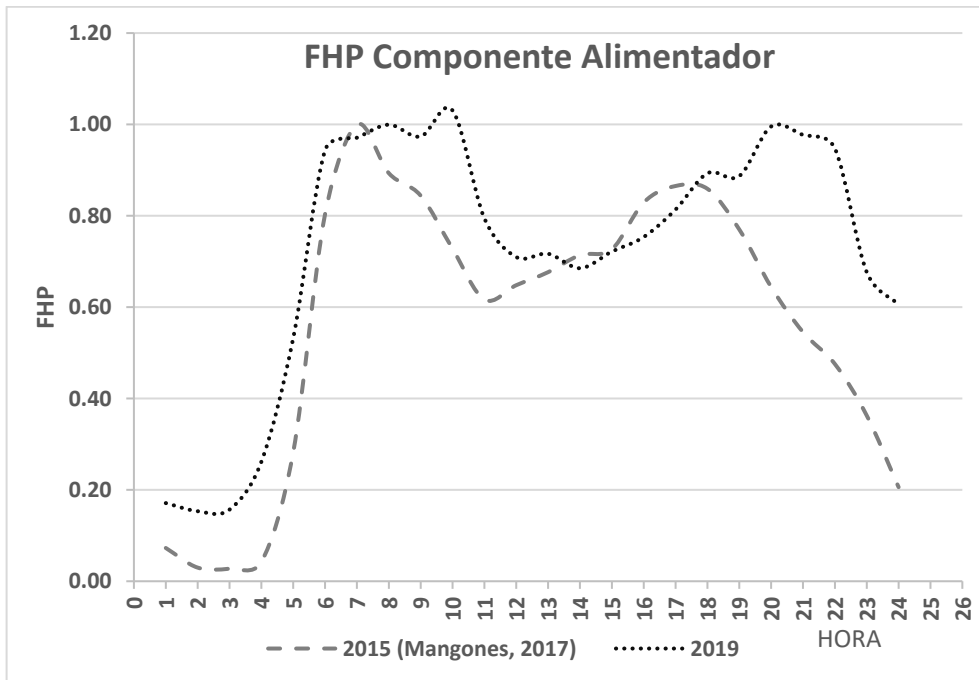
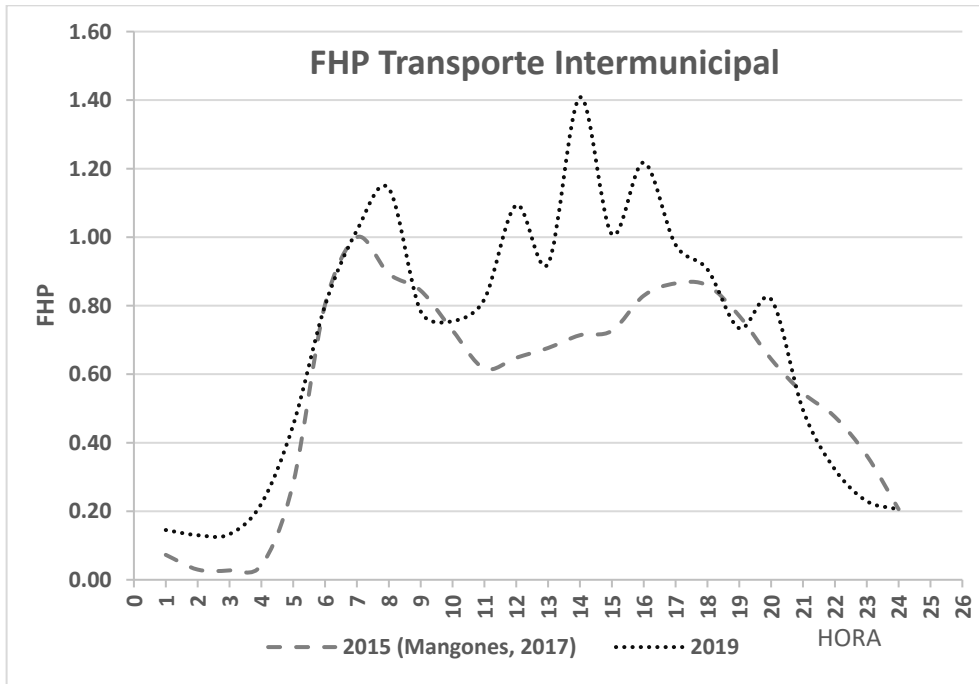
World Health Organization. (2011). EXPOSURE TO AIR POLLUTION (PARTICULATE MATTER) IN OUTDOOR AIR. *The Lancet*, 16(2), 1–2. https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/ENHIS_Factsheet_3.3_July_2011.pdf

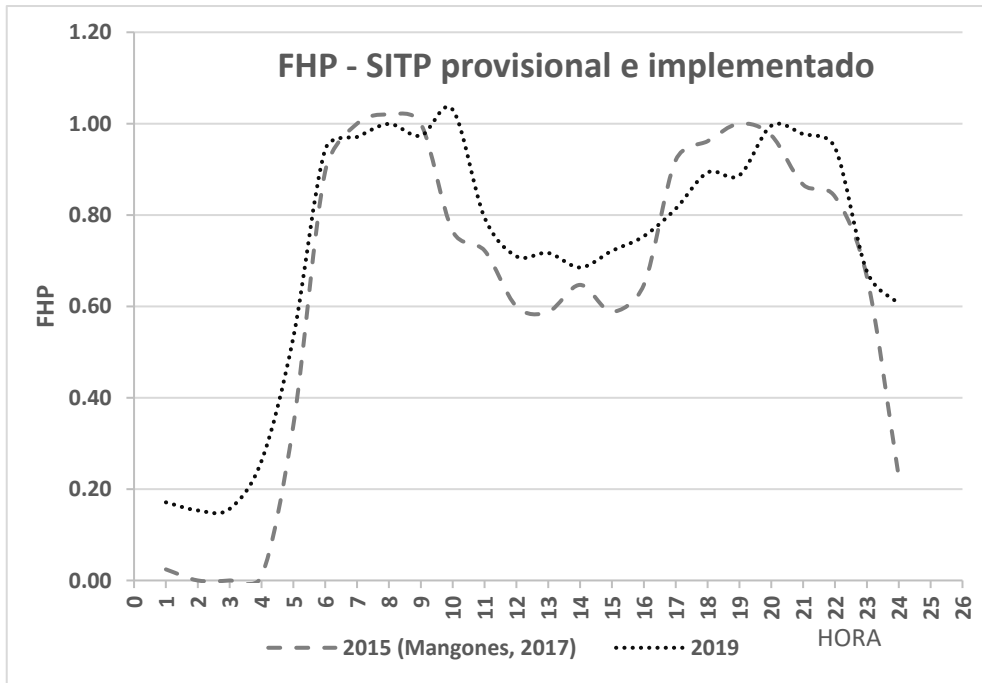
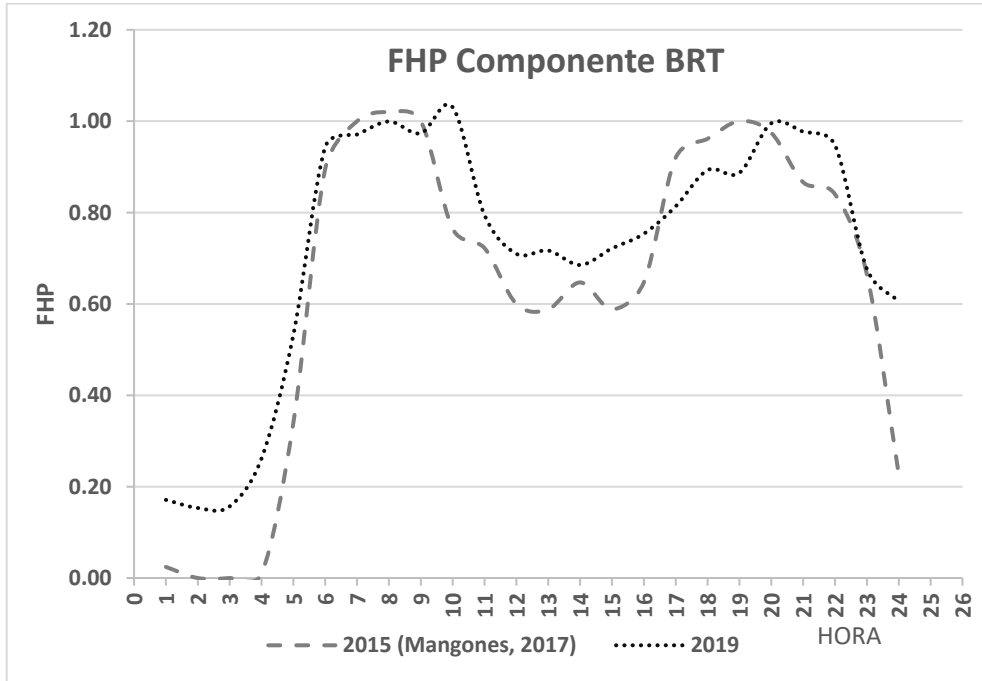
Zarate, E. (2007). *Understanding the Origins and Fate of Air Pollution in Bogotá, Colombia*. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3768>

Zhao, Y., & Sadek, A. W. (2013). Computationally-Efficient Approaches to Integrating the MOVES Emissions Model with Traffic Simulators. *Procedia - Procedia Computer Science*, 19, 882–887. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.118>

A. Anexo: Factor Hora Pico.







B. Anexo: Distribución tecnológica parque automotor.

- Análisis normativo nacional de emisiones.

TIPO DE COMBUSTIBLE Y TECNOLOGÍA VEHICULAR		1990 y antes	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
AMVA	GASOLINA	Ninguno			Catalizador de 2 o 3 vías															Euro II		Euro III			Euro IV					Euro V												
	DIESEL	Pre Euro									Euro II*		Euro IV			Euro V																										
RESOLUCIÓN 005 DE 1996	GASOLINA/DIESEL PARA CICLOS FTP-75 Y USA-13	SIN NORMA			EURO I VEHICULOS LIVIVANOS																																					
	GASOLINA/DIESEL PARA CICLOS ECE-15 Y ECE-13 (R49-01)	SIN NORMA			EURO I VEHICULOS LIVIVANOS																																					
RESOLUCIÓN 1048 DE 1999	GASOLINA												EURO I VEHICULOS LIVIVANOS																													
	DIESEL												EURO I VEHICULOS LIVIANOS Y VEHICULOS PESADOS																													
RESOLUCIÓN 910 DE 2008	MOTOCICLETAS, MOTOTRICICLOS Y MOTOCICLOS	SIN NORMA											EURO 2																													
	GASOLINA												EURO II VEHICULOS LIVIANOS, PESADOS (CAMIONES Y AUTOBUSES)																													
	DIESEL - CICLO DIESEL												EURO II VEHICULOS LIVIANOS, PESADOS PRIVADOS (CAMIONES Y AUTOBUSES)																													
	GAS NATURAL Y GAS NATURAL LICUADO - CICLO OTTO																																									
RESOLUCIÓN 2604 DE 2009	GASOLINA																																									
	DIESEL - CICLO DIESEL (BIODIESEL, MEZCLAS DE DIESEL CON GN Y GNL)												EURO 4 PARA CAMIONES, LIVIANOS Y AUTOBUSES PÚBLICO																													
	GAS NATURAL Y GAS NATURAL LICUADO - CICLO OTTO												EURO 4 PARA CAMIONES, LIVIANOS Y AUTOBUSES PÚBLICO																													
RESOLUCIÓN 1111 DE 2013	GASOLINA																																									
	DIESEL - CICLO DIESEL (BIODIESEL, MEZCLAS DE DIESEL CON GN Y GNL)												EURO 4 PARA CAMIONES, LIVIANOS Y AUTOBUSES																													
	GAS NATURAL Y GAS NATURAL LICUADO - CICLO OTTO												EURO 4 PARA CAMIONES, LIVIANOS Y AUTOBUSES																													
LEY 1972 DE 2019	MOTOCICLETAS, MOTOTRICICLOS Y MOTOCICLOS																EURO III																									
	DIESEL																					EURO IV																				

- **Distribución tecnológica de automóviles.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Passenger Cars-Mini	Petrol	Conventional	3.658%
Passenger Cars-Mini	Petrol	Euro 4	0.310%
Passenger Cars-Mini	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.001%
Passenger Cars-Mini	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	0.016%
Passenger Cars-Small	Petrol	Conventional	16.535%
Passenger Cars-Small	Petrol	Euro 1	25.570%
Passenger Cars-Small	Petrol	Euro 3	10.584%
Passenger Cars-Small	Petrol	Euro 4	3.069%
Passenger Cars-Small	Petrol Hybrid	Euro 4	0.007%
Passenger Cars-Small	Diesel	Conventional	0.029%
Passenger Cars-Small	Diesel	Euro 2	0.001%
Passenger Cars-Small	Diesel	Euro 4	0.017%
Passenger Cars-Small	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.005%
Passenger Cars-Small	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	0.286%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Conventional	4.347%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Euro 1	7.306%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Euro 3	4.566%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Euro 4	1.220%
Passenger Cars-Medium	Petrol Hybrid	Euro 4	0.012%
Passenger Cars-Medium	Diesel	Conventional	0.189%
Passenger Cars-Medium	Diesel	Euro 2	0.273%
Passenger Cars-Medium	Diesel	Euro 4	0.251%
Passenger Cars-Medium	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.003%
Passenger Cars-Medium	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	0.160%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Conventional	6.322%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 1	7.759%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 3	2.440%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 4	0.515%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol Hybrid	Euro 4	0.012%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Diesel	Conventional	1.285%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Diesel	Euro 2	1.019%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Diesel	Euro 4	1.474%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.007%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	0.751%

- **Distribución tecnológica de taxis.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Passenger Cars-Mini	Petrol	Conventional	0.1%
Passenger Cars-Mini	Petrol	Euro 4	2.5%
Passenger Cars-Mini	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.0%
Passenger Cars-Mini	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	14.3%
Passenger Cars-Small	Petrol	Conventional	3.9%
Passenger Cars-Small	Petrol	Euro 1	51.8%
Passenger Cars-Small	Petrol	Euro 3	15.7%
Passenger Cars-Small	Petrol	Euro 4	2.8%
Passenger Cars-Small	Diesel	Conventional	0.1%
Passenger Cars-Small	Diesel	Euro 2	0.0%
Passenger Cars-Small	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.0%
Passenger Cars-Small	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	7.3%

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Conventional	0.1%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Euro 1	0.1%
Passenger Cars-Medium	Petrol	Euro 3	0.2%
Passenger Cars-Medium	Diesel	Conventional	0.5%
Passenger Cars-Medium	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	0.1%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Conventional	0.4%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 1	0.0%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Diesel	Conventional	0.0%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	0.0%

- Distribución tecnológica de motos**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
L-Category-Mopeds 2-stroke <50 cm ³	Petrol	Conventional	0.0%
L-Category-Mopeds 4-stroke <50 cm ³	Petrol	Conventional	0.1%
L-Category-Mopeds 4-stroke <50 cm ³	Petrol	Euro 2	0.0%
L-Category-Motorcycles 2-stroke >50 cm ³	Petrol	Conventional	1.6%
L-Category-Motorcycles 4-stroke <250 cm ³	Petrol	Conventional	25.0%
L-Category-Motorcycles 4-stroke <250 cm ³	Petrol	Euro 2	69.0%
L-Category-Motorcycles 4-stroke 250-750cm ³	Petrol	Conventional	1.1%
L-Category-Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³	Petrol	Euro 2	2.2%
L-Category-Motorcycles 4-stroke >750 cm ³	Petrol	Conventional	0.3%
L-Category-Motorcycles 4-stroke >750 cm ³	Petrol	Euro 2	0.8%

- Distribución tecnológica de Buses SITP Provisional.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 1	2.4%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 2	0.0%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	Petrol	Euro 3	0.0%
Buses-Urban Biodiesel Buses	Biodiesel	Euro 2	0.0%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Conventional	42.7%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 2	16.7%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 4	30.9%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 5	4.3%
Buses-Urban Buses Diesel Hybrid	Diesel Hybrid - Diesel	Euro 6	0.7%
Buses-Urban CNG Buses	CNG	Euro 1	1.3%
Buses-Urban CNG Buses	CNG	Euro 2	0.0%
Buses-Urban CNG Buses	CNG	Euro 3	0.9%

- Distribución tecnológica de Buses SITP Implementado.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 3	23.5%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 4	15.7%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 5	23.0%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 3	0.3%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 4	0.0%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 5	23.3%
Buses-Urban Buses Diesel Hybrid	Diesel Hybrid - Diesel	Euro 6	4.6%
Buses-Urban CNG Buses	CNG	EEV	9.6%

- **Distribución tecnológica de componente alimentador.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 2	0.4%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 4	1.3%
Buses-Urban Buses Midi <=15 t	Diesel	Euro 5	2.7%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 3	1.7%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 4	3.6%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 5	64.5%
Buses-Urban Buses Diesel Hybrid	Diesel Hybrid - Diesel	Euro 6	7.2%
Buses-Urban CNG Buses	CNG	EEV	18.5%

- **Distribución tecnológica de componente troncal.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 5	2.0%
Buses-Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Euro 6	3.2%
Buses-Urban Buses Articulated >18 t	Diesel	Euro 2	5.0%
Buses-Urban Buses Articulated >18 t	Diesel	Euro 3	1.9%
Buses-Urban Buses Articulated >18 t	Diesel	Euro 4	3.2%
Buses-Urban Buses Articulated >18 t	Diesel	Euro 5	19.4%
Buses-Urban Buses Articulated >18 t	Diesel	Euro 6	31.7%
Buses-Urban CNG Buses	CNG	EEV	33.6%

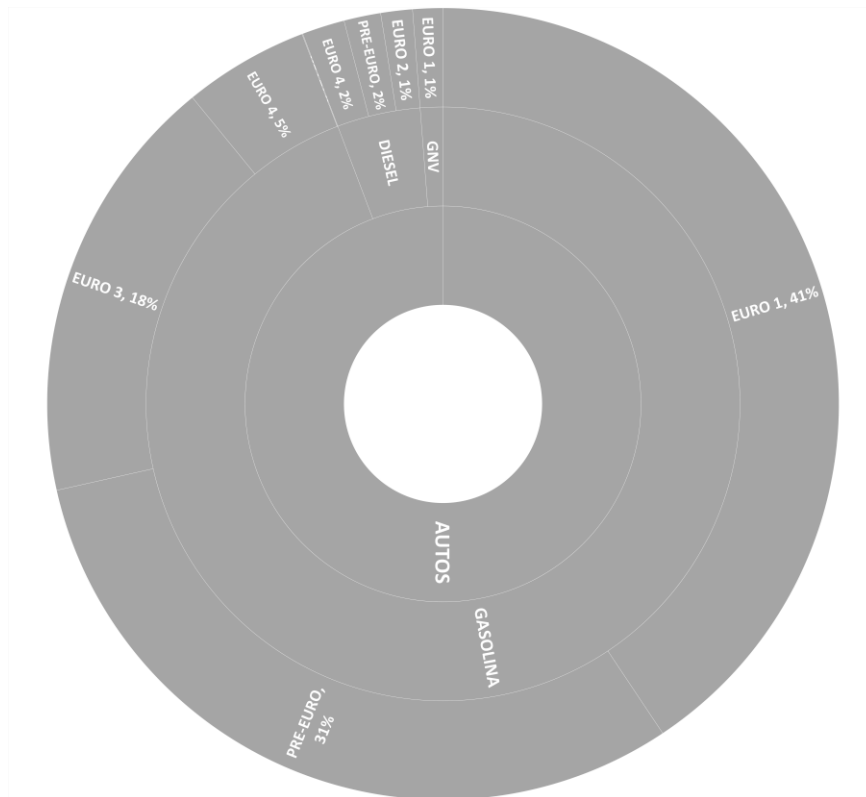
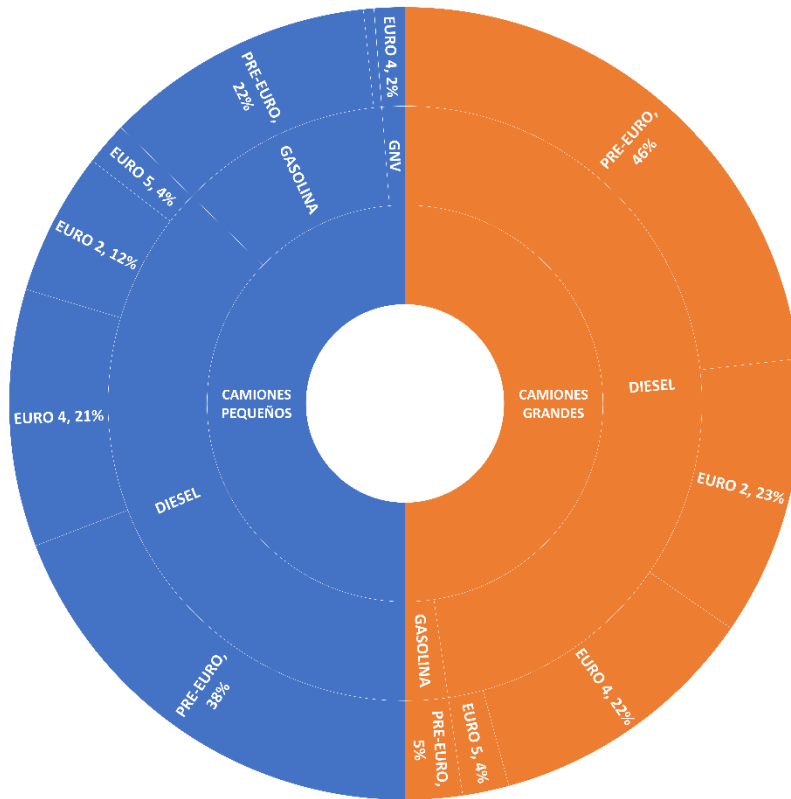
- **Distribución tecnológica de camiones pequeños.**

TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	CNG Bifuel - CNG	Euro 4	0.10%
Passenger Cars-Large-SUV-Executive	CNG Bifuel - Petrol	Euro 4	2.40%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Petrol	Conventional	4.19%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Petrol	Euro 1	0.33%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Petrol	Euro 3	0.01%
Light Commercial Vehicles-N1-II	Petrol	Conventional	0.03%
Light Commercial Vehicles-N1-II	Petrol	Euro 1	0.01%
Light Commercial Vehicles-N1-III	Petrol	Conventional	8.26%
Light Commercial Vehicles-N1-III	Petrol	Euro 1	0.52%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Diesel	Conventional	1.64%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Diesel	Euro 2	0.14%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Diesel	Euro 4	0.25%
Light Commercial Vehicles-N1-I	Diesel	Euro 5	0.03%
Light Commercial Vehicles-N1-II	Diesel	Conventional	0.45%
Light Commercial Vehicles-N1-II	Diesel	Euro 2	0.16%
Light Commercial Vehicles-N1-II	Diesel	Euro 4	0.08%
Light Commercial Vehicles-N1-II	Diesel	Euro 5	0.02%
Light Commercial Vehicles-N1-III	Diesel	Conventional	13.87%
Light Commercial Vehicles-N1-III	Diesel	Euro 2	4.15%
Light Commercial Vehicles-N1-III	Diesel	Euro 4	5.33%
Light Commercial Vehicles-N1-III	Diesel	Euro 5	0.73%
Heavy Duty Trucks->3,5 t	Petrol	Conventional	9.64%
Heavy Duty Trucks-Rigid <=7,5 t	Diesel	Conventional	14.47%
Heavy Duty Trucks-Rigid <=7,5 t	Diesel	Euro 2	6.05%

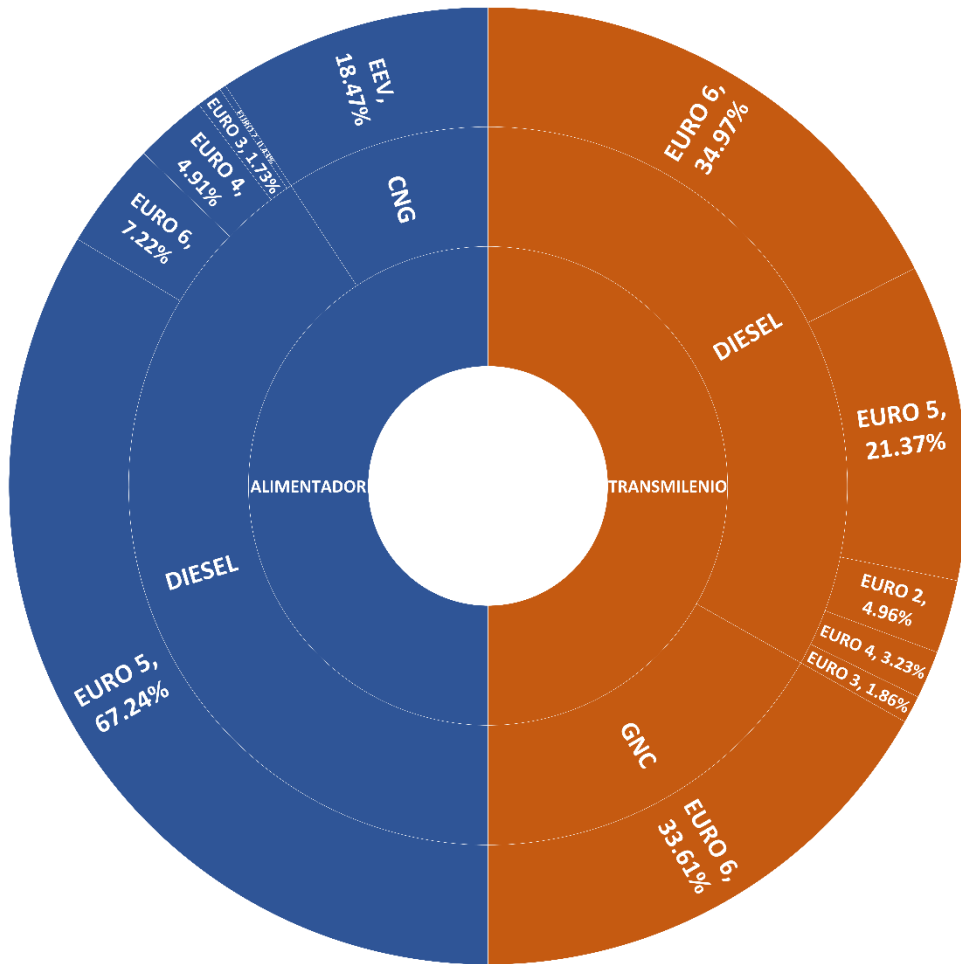
TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Heavy Duty Trucks-Rigid <=7,5 t	Diesel	Euro 4	13.23%
Heavy Duty Trucks-Rigid <=7,5 t	Diesel	Euro 5	2.14%
Heavy Duty Trucks-Rigid 7,5 - 12 t	Diesel	Conventional	7.88%
Heavy Duty Trucks-Rigid 7,5 - 12 t	Diesel	Euro 2	1.19%
Heavy Duty Trucks-Rigid 7,5 - 12 t	Diesel	Euro 4	2.10%
Heavy Duty Trucks-Rigid 7,5 - 12 t	Diesel	Euro 5	0.61%

- **Distribución tecnológica de camiones grandes.**

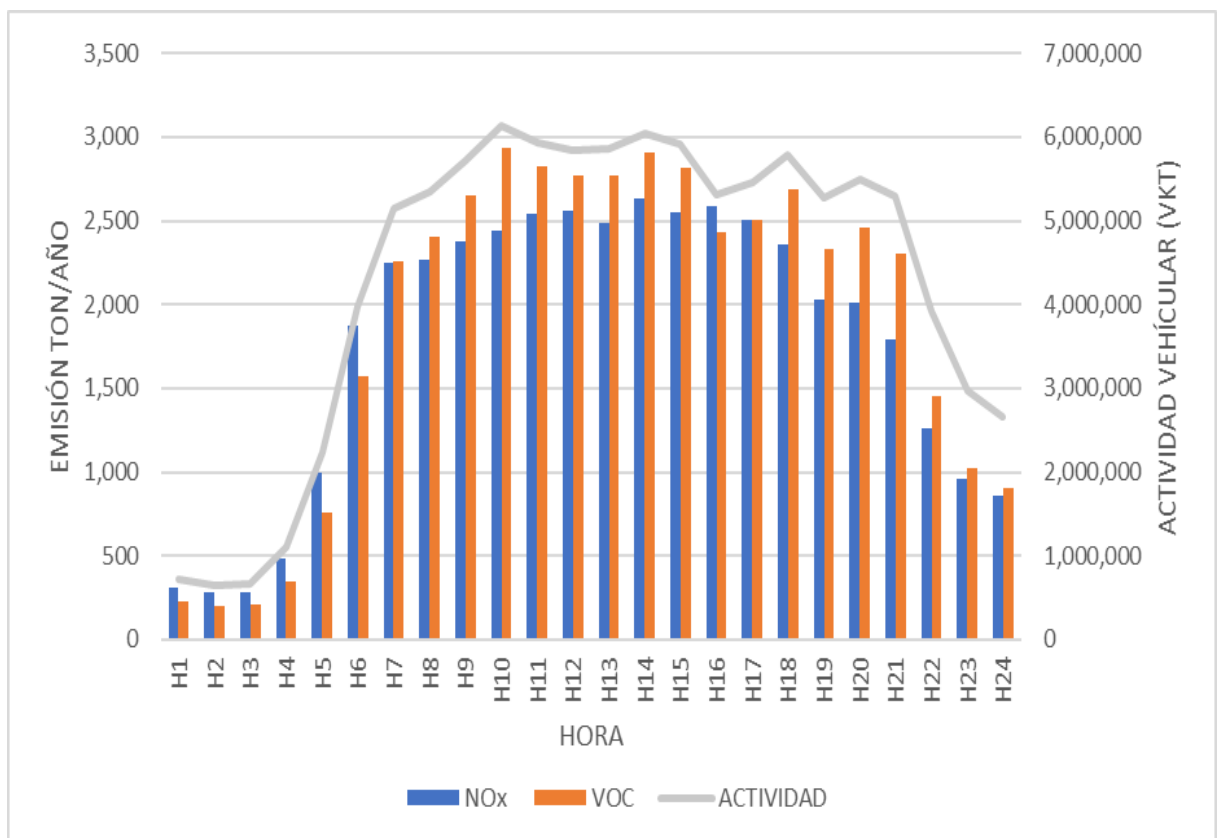
TIPOLOGÍA	COMBUSTIBLE	ESTANDAR	%
Heavy Duty Trucks->3,5 t	Petrol	Conventional	4.7%
Heavy Duty Trucks-Rigid 12 - 14 t	Diesel	Conventional	12.0%
Heavy Duty Trucks-Rigid 12 - 14 t	Diesel	Euro 2	0.2%
Heavy Duty Trucks-Rigid 12 - 14 t	Diesel	Euro 4	1.9%
Heavy Duty Trucks-Rigid 12 - 14 t	Diesel	Euro 5	0.9%
Heavy Duty Trucks-Rigid 14 - 20 t	Diesel	Conventional	12.9%
Heavy Duty Trucks-Rigid 14 - 20 t	Diesel	Euro 2	7.9%
Heavy Duty Trucks-Rigid 14 - 20 t	Diesel	Euro 4	11.4%
Heavy Duty Trucks-Rigid 14 - 20 t	Diesel	Euro 5	1.1%
Heavy Duty Trucks-Rigid 20 - 26 t	Diesel	Conventional	0.8%
Heavy Duty Trucks-Rigid 20 - 26 t	Diesel	Euro 2	0.1%
Heavy Duty Trucks-Rigid 20 - 26 t	Diesel	Euro 4	0.2%
Heavy Duty Trucks-Rigid 20 - 26 t	Diesel	Euro 5	0.1%
Heavy Duty Trucks-Rigid 26 - 28 t	Diesel	Conventional	0.1%
Heavy Duty Trucks-Rigid 26 - 28 t	Diesel	Euro 4	0.0%
Heavy Duty Trucks-Rigid 28 - 32 t	Diesel	Conventional	0.2%
Heavy Duty Trucks-Rigid >32 t	Diesel	Conventional	0.1%
Heavy Duty Trucks-Rigid >32 t	Diesel	Euro 2	0.0%
Heavy Duty Trucks-Articulated 14 - 20 t	Diesel	Conventional	19.7%
Heavy Duty Trucks-Articulated 14 - 20 t	Diesel	Euro 2	13.8%
Heavy Duty Trucks-Articulated 14 - 20 t	Diesel	Euro 4	8.2%
Heavy Duty Trucks-Articulated 14 - 20 t	Diesel	Euro 5	1.7%
Heavy Duty Trucks-Articulated 20 - 28 t	Diesel	Conventional	0.0%
Heavy Duty Trucks-Articulated 20 - 28 t	Diesel	Euro 2	0.0%
Heavy Duty Trucks-Articulated 20 - 28 t	Diesel	Euro 4	0.0%
Heavy Duty Trucks-Articulated 28 - 34 t	Diesel	Conventional	0.0%
Heavy Duty Trucks-Articulated 28 - 34 t	Diesel	Euro 4	0.0%
Heavy Duty Trucks-Articulated 34 - 40 t	Diesel	Conventional	0.5%
Heavy Duty Trucks-Articulated 34 - 40 t	Diesel	Euro 2	0.7%
Heavy Duty Trucks-Articulated 34 - 40 t	Diesel	Euro 4	0.6%
Heavy Duty Trucks-Articulated 40 - 50 t	Diesel	Euro 2	0.0%

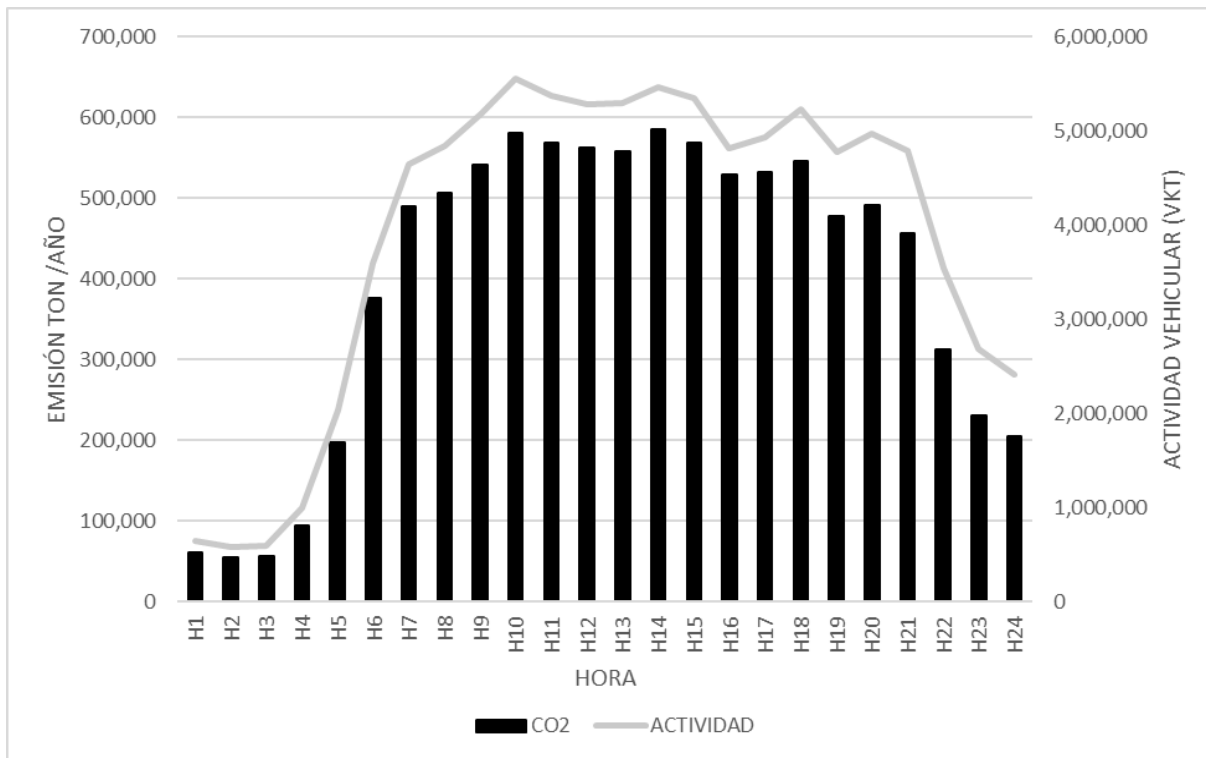
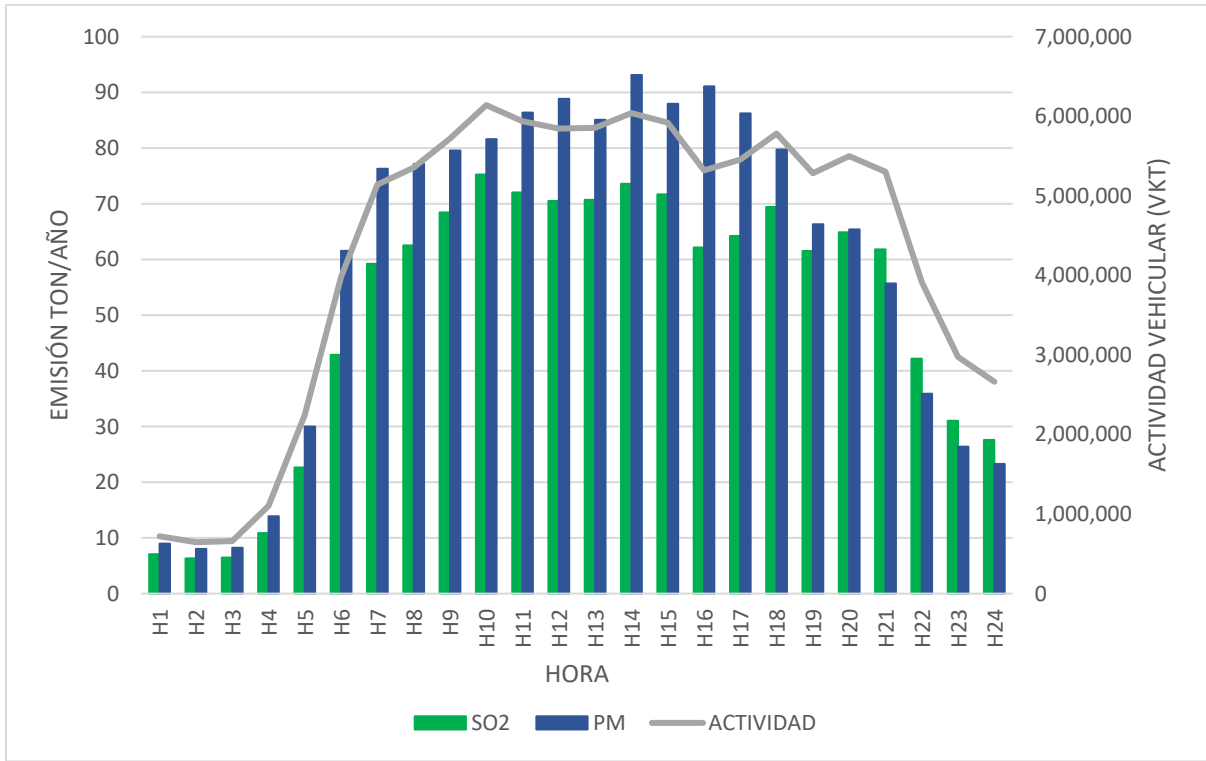


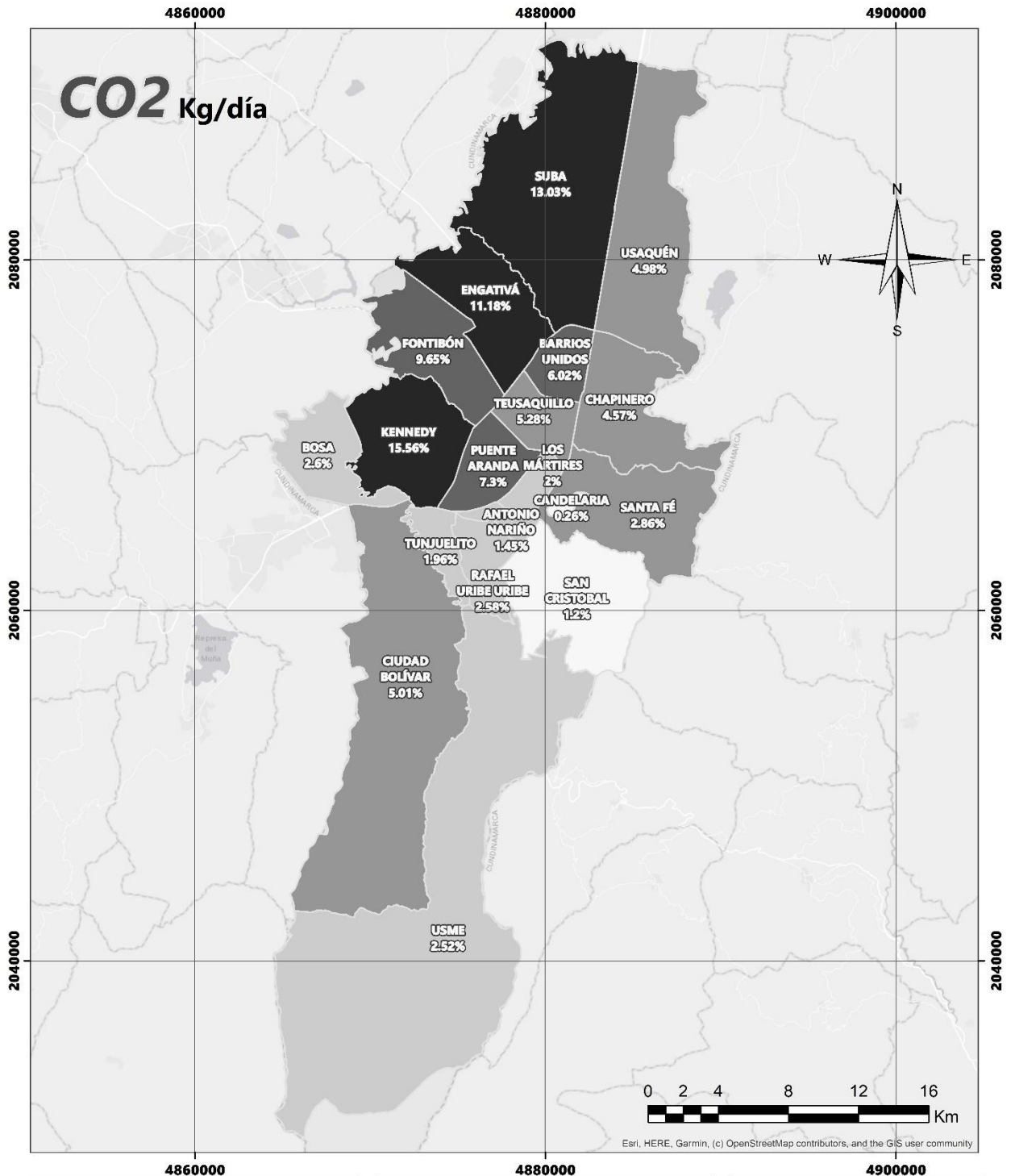




C. Anexo: Resultados inventario de emisiones Bottom - Up.





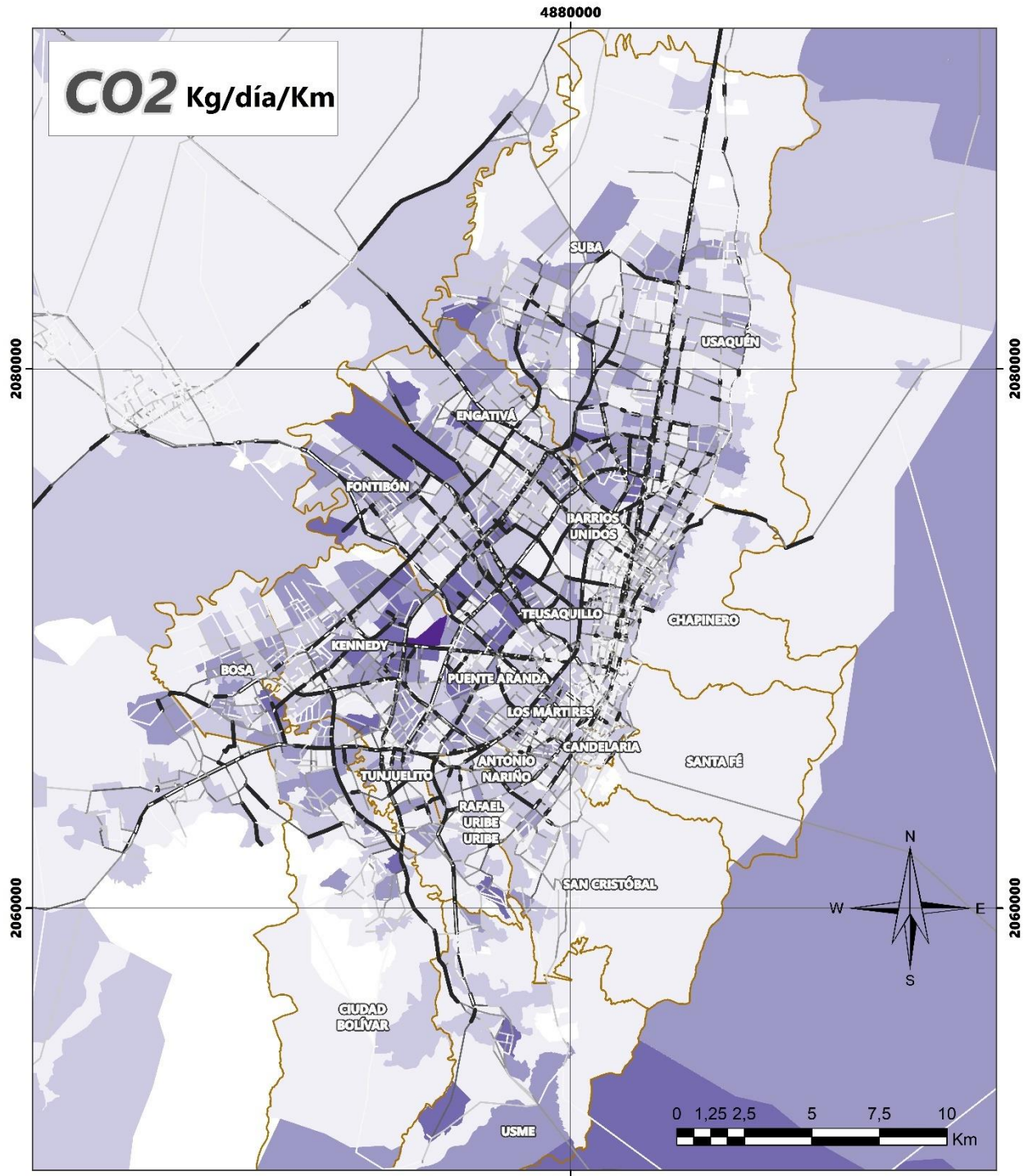


CONVENCIONES

Light Gray	Menor o igual a 300.000 Kg/día
Medium Gray	De 300.000,1 a 600.000 Kg/día
Dark Gray	De 600.000,1 a 1.300.000 Kg/día
Black	De 1.300.000,1 a 2.500.000 Kg/día
Black	Mayor a 2.500.000 Kg/día

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Datum: MAGNA - EPSG: 9377
 Proyección: Transversa de Mercator
 Elipsoide: GRS80
 Falso Este: 5000000
 Falso Norte: 2000000

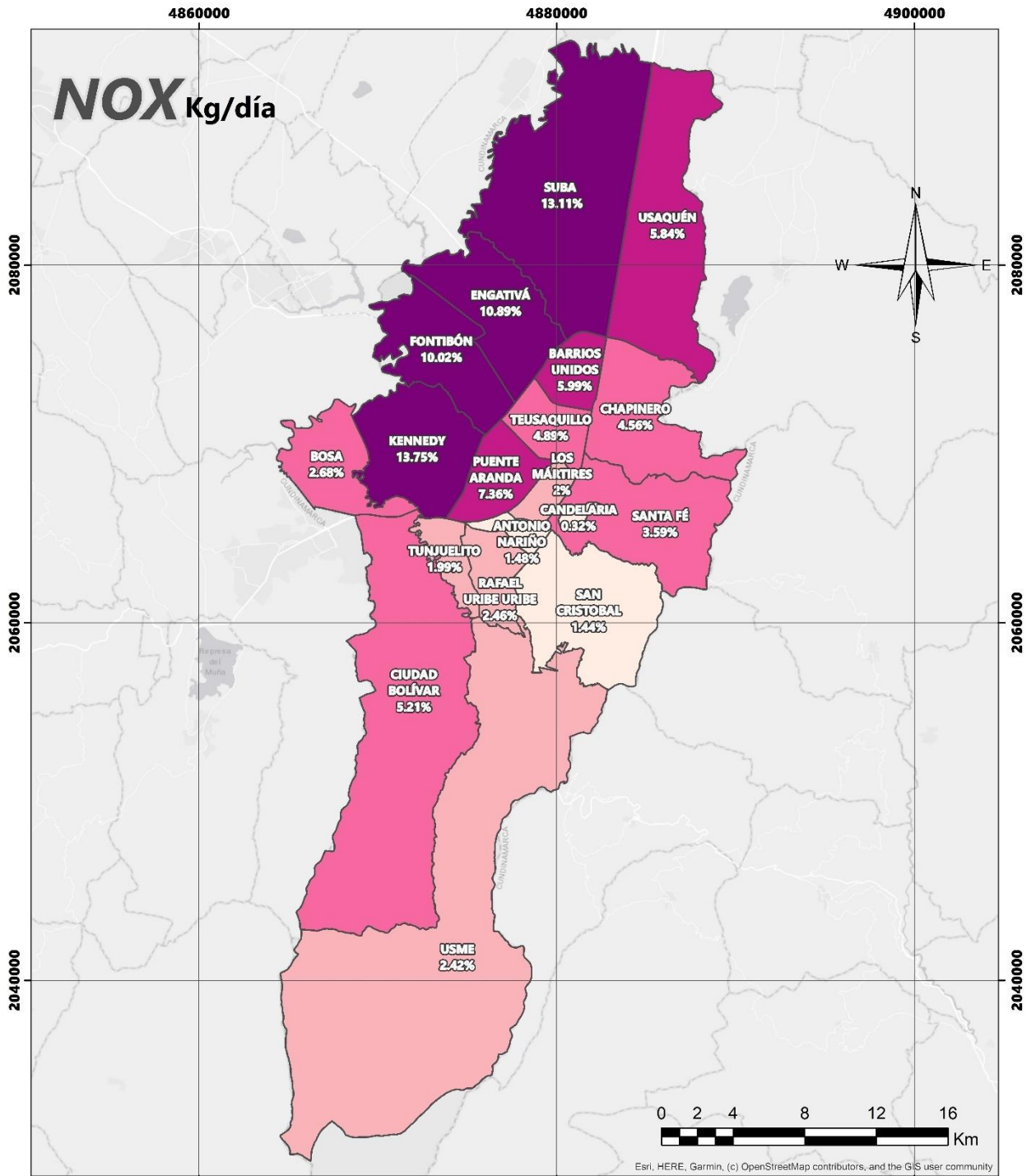


CONVENCIONES

— Menor o igual a 500 Kg/día/Km	■ Menor o igual a 1.000 Kg/día
— De 500,1 a 2.000 Kg/día/Km	■ De 1.000,1 a 10.000 Kg/día
— De 2.000,1 a 5.000 Kg/día/Km	■ De 10.000,1 a 40.000 Kg/día
— De 5.000,1 a 8.000 Kg/día/Km	■ De 40.000,1 a 200.000 Kg/día
— Mayor a 8.000 Kg/día/Km	■ Mayor a 200.000 Kg/día
■ Localidades Bogotá D.C.	

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Datum: MAGNA
 EPSG: 9377
 Proyección: Transversa de Mercator
 Elipsoide: GRS80
 Falso Este: 5000000
 Falso Norte: 2000000

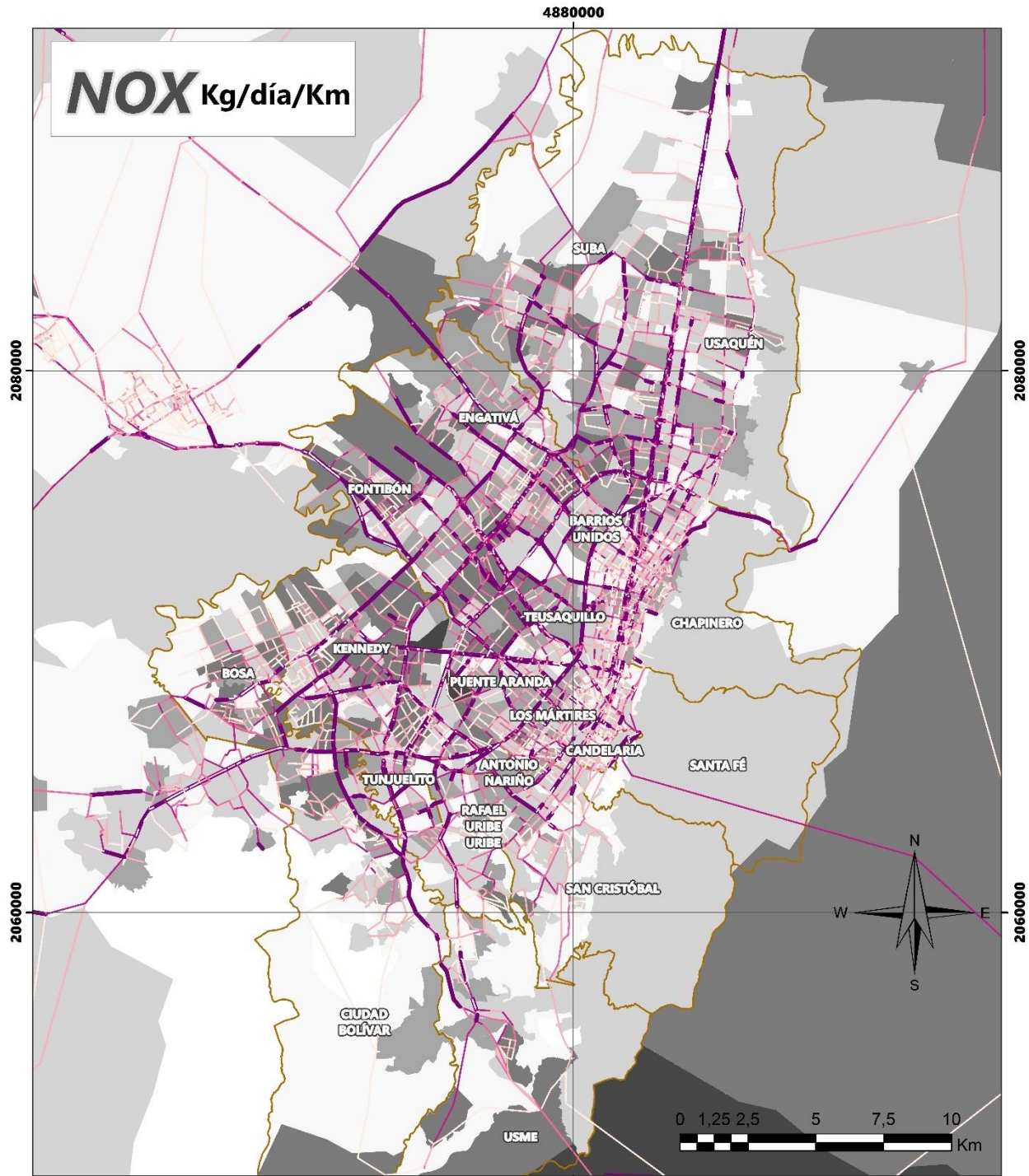


CONVENCIONES

	Menor o igual a 1.500 Kg/día
	De 1.500,1 a 2.500 Kg/día
	De 2.500,1 a 5.000 Kg/día
	De 5.000,1 a 7.000 Kg/día
	Mayor a 7.000 Kg/día

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Datum: MAGNA - EPSG: 9377
 Proyección: Transversa de Mercator
 Elipsoide: GRS80
 Falso Este: 5000000
 Falso Norte: 2000000

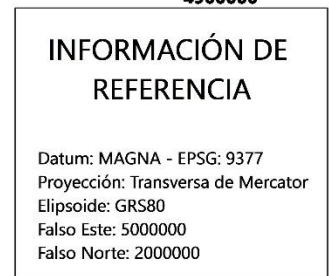
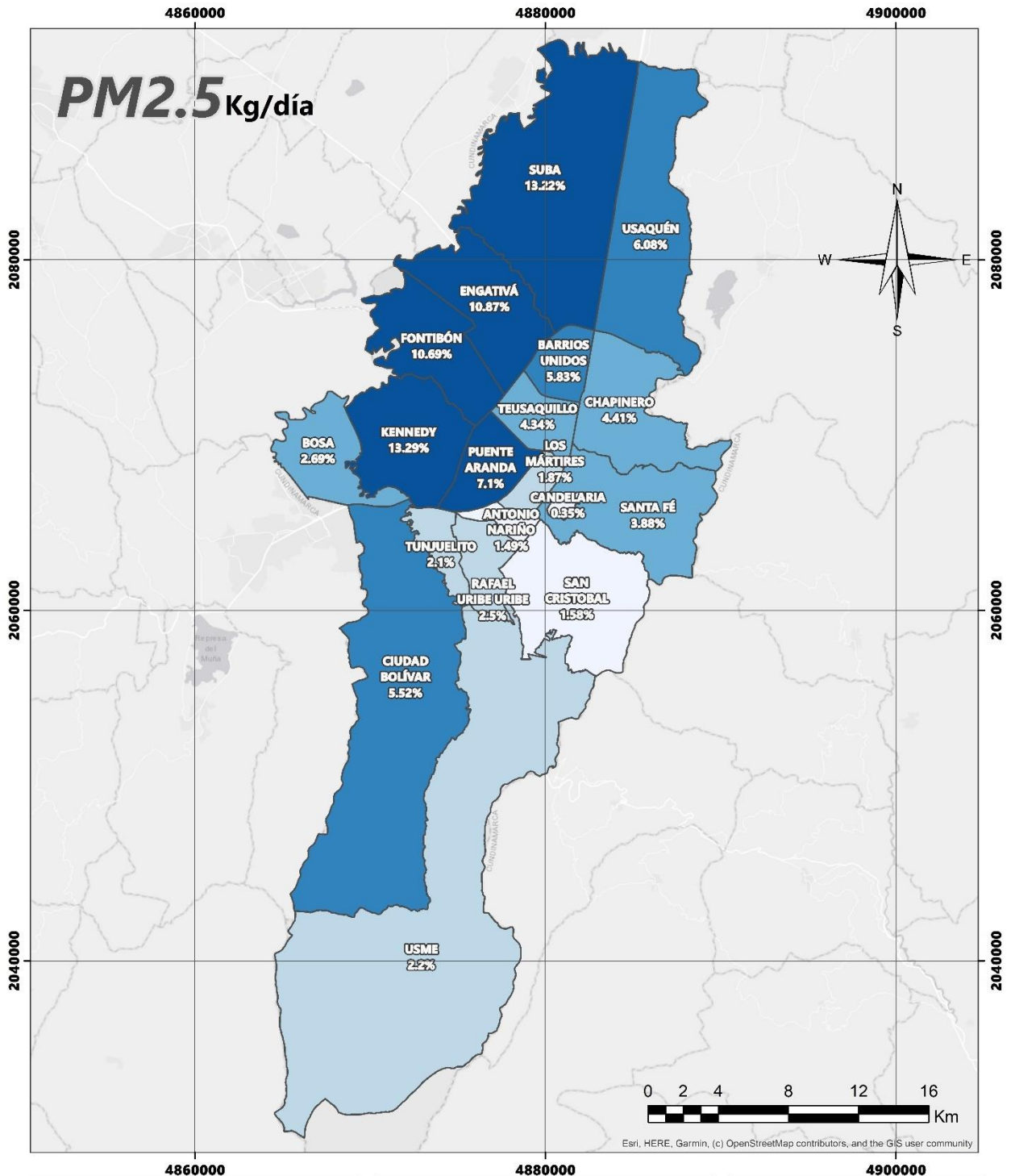


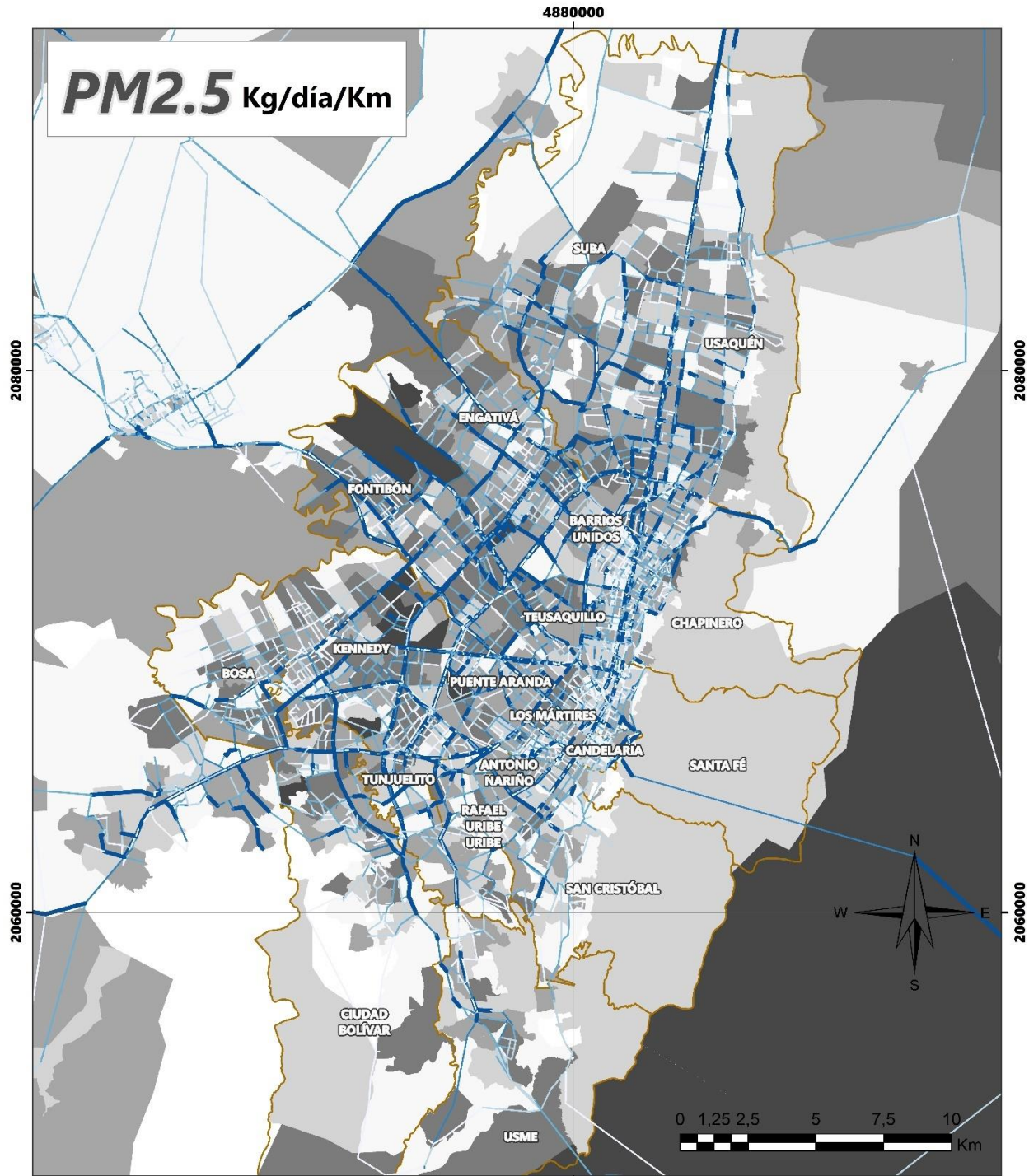
CONVENCIONES

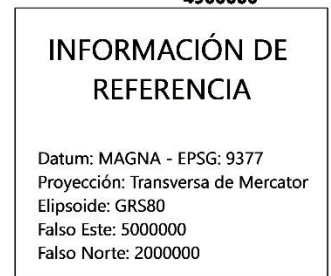
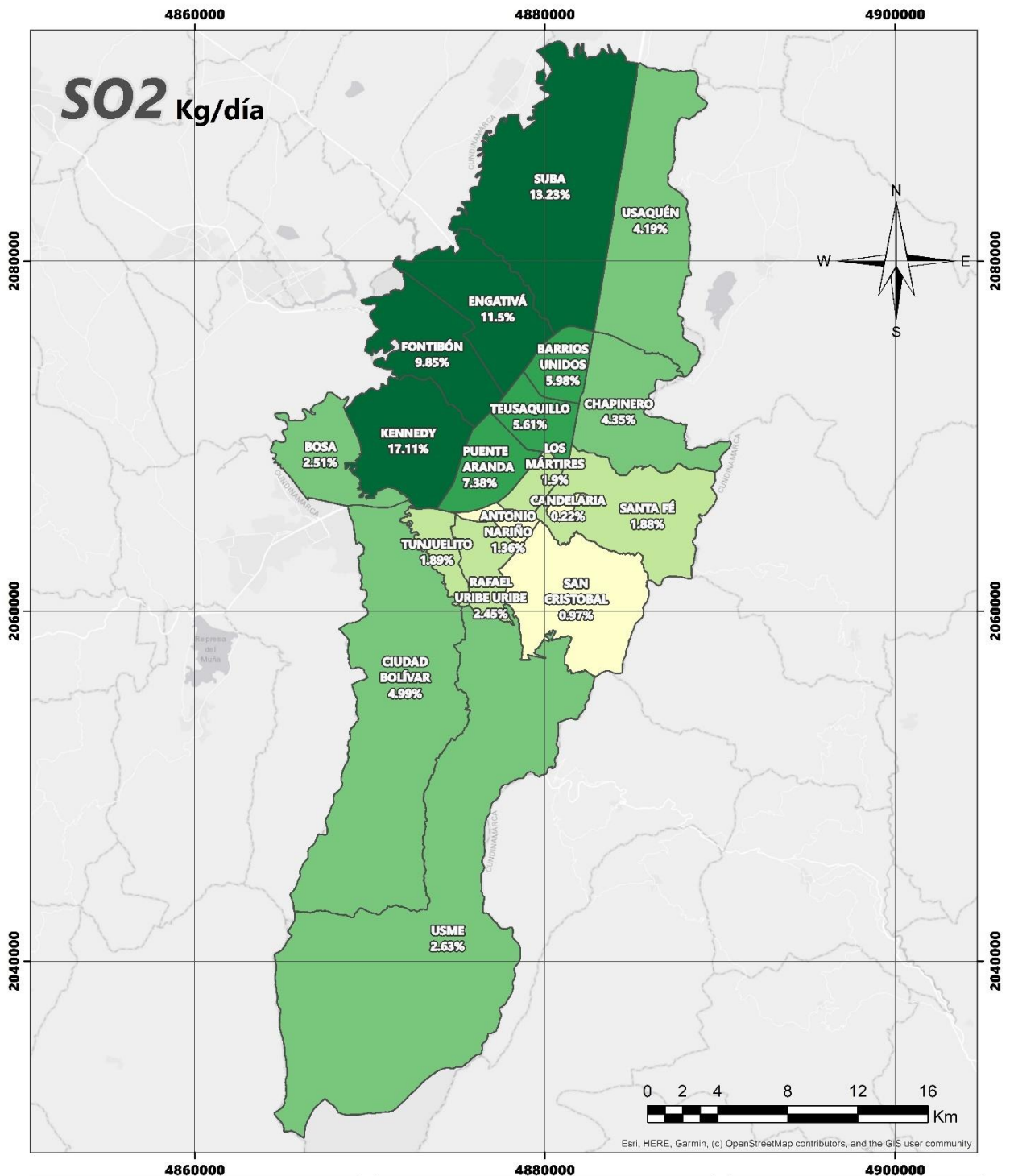
Menor o igual a 3 Kg/día/Km	Menor o igual a 1 Kg/día
De 3,1 a 10 Kg/día/Km	De 1,1 a 10 Kg/día
De 10,1 a 20 Kg/día/Km	De 10,1 a 50 Kg/día
De 20,1 a 40 Kg/día/Km	De 50,1 a 500 Kg/día
Mayor a 40 Kg/día/Km	Mayor a 500 Kg/día
Localidades Bogotá D.C.	

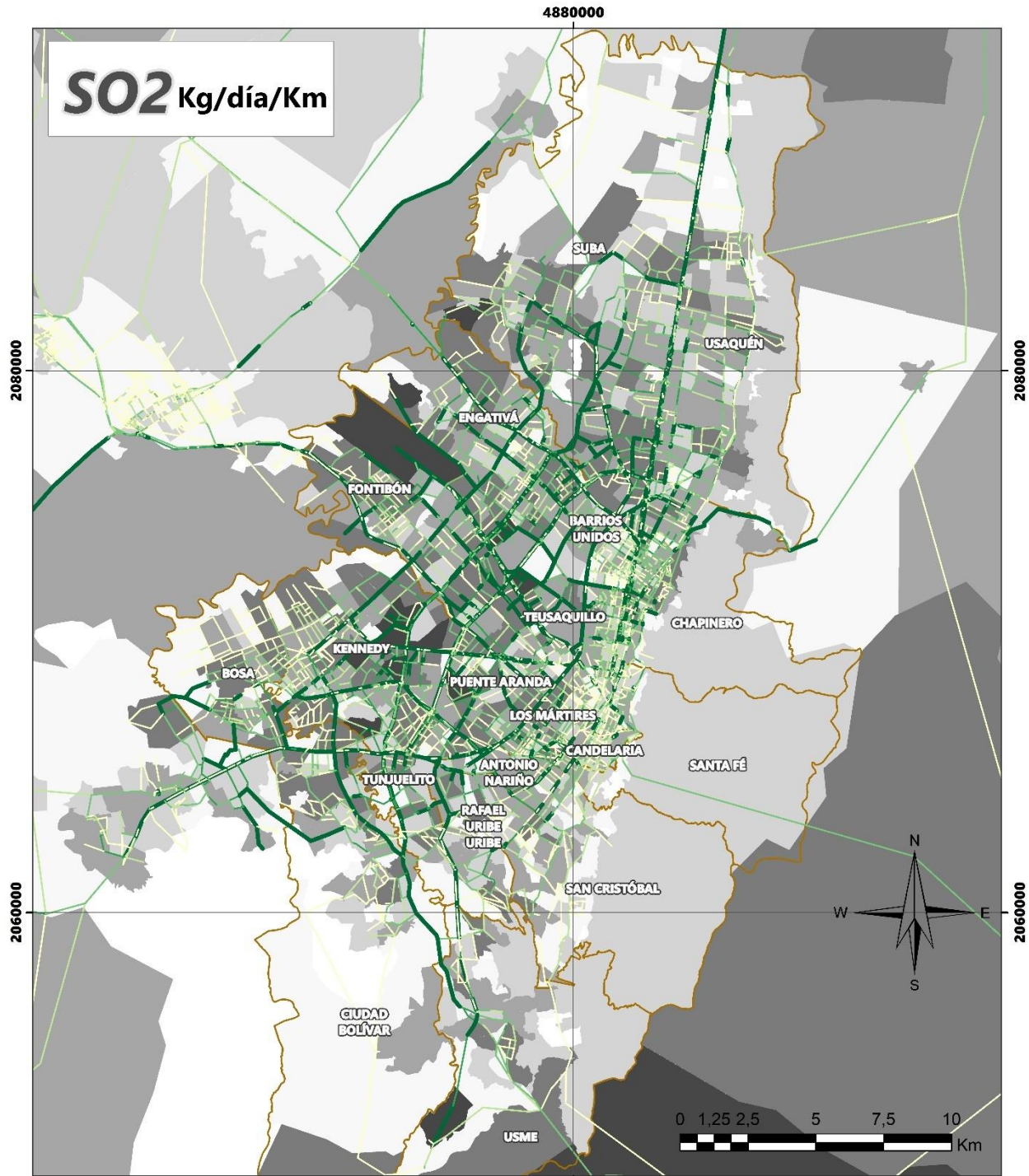
INFORMACIÓN DE REFERENCIA

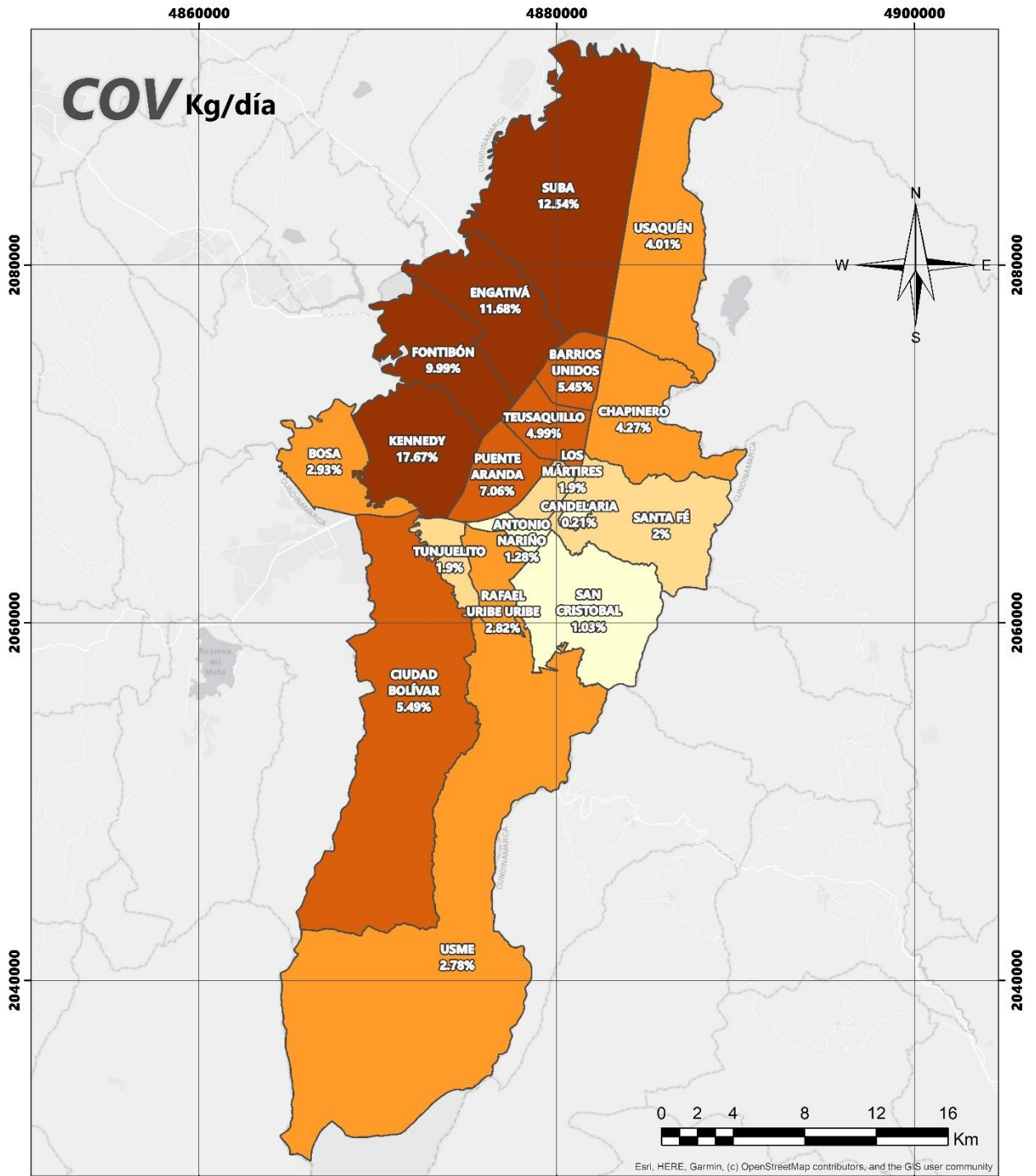
Datum: MAGNA
 EPSG: 9377
 Proyección: Transversa de Mercator
 Elipsoide: GRS80
 Falso Este: 5000000
 Falso Norte: 2000000









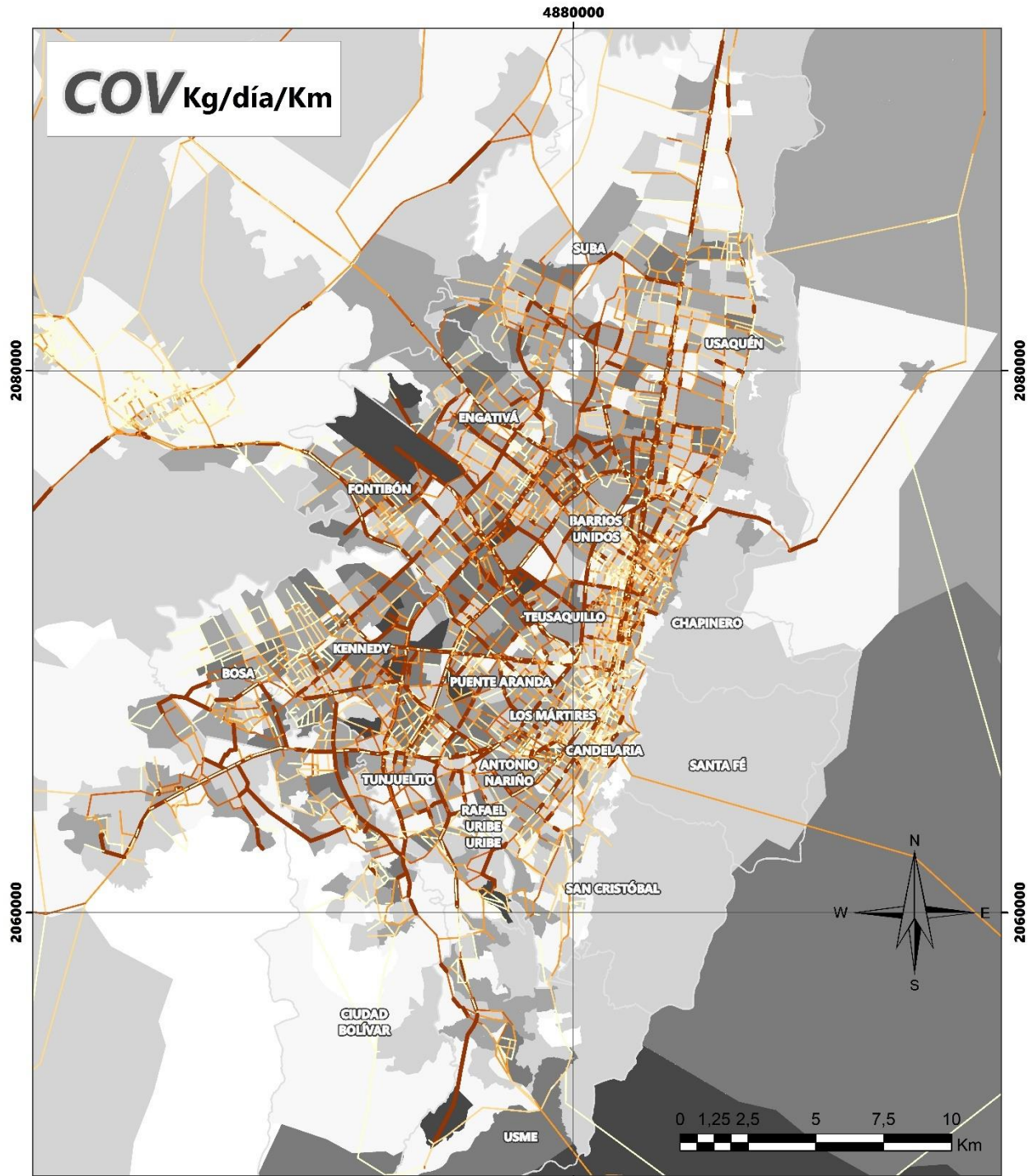


CONVENCIONES

	Menor o igual a 2.000 Kg/día
	De 2.000,1 a 3.000 Kg/día
	De 3.000,1 a 5.000 Kg/día
	De 5.000,1 a 10.000 Kg/día
	Mayor a 10.000

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Datum: MAGNA - EPSG: 9377
 Proyección: Transversa de Mercator
 Elipsoide: GRS80
 Falso Este: 5000000
 Falso Norte: 2000000



CONVENCIONES

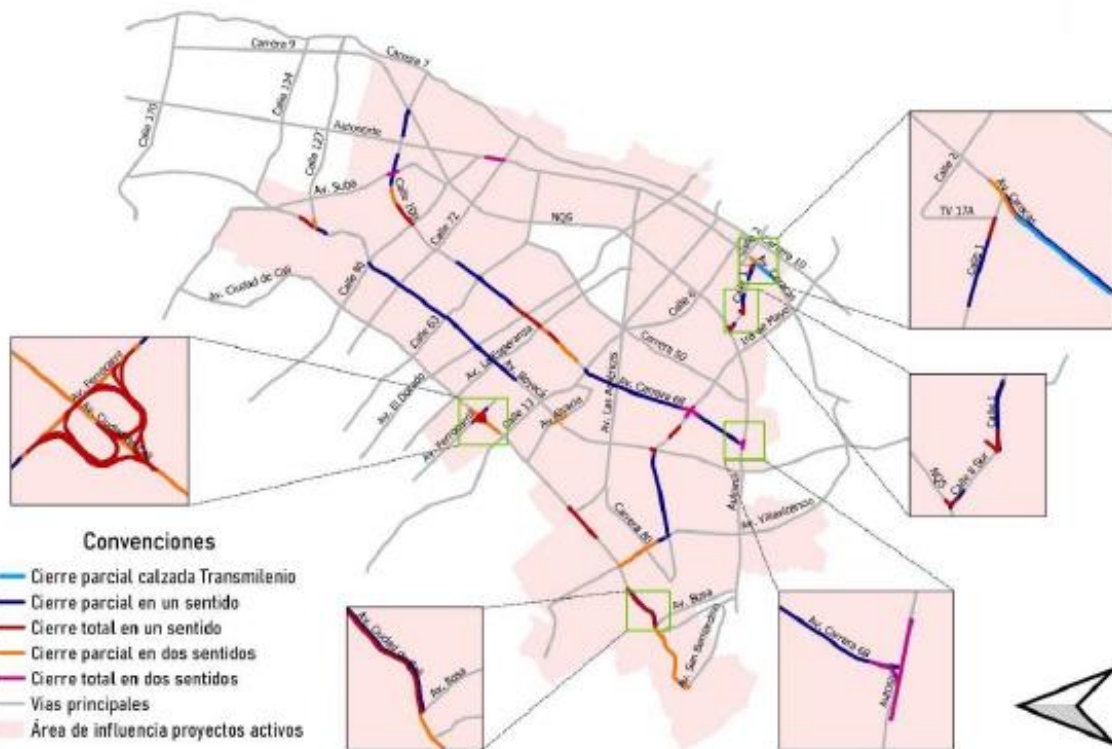
Menor o igual a 1 Kg/día/Km	Menor o igual a 1 Kg/día
De 1,1 a 5 Kg/día/Km	De 1,1 a 10 Kg/día
De 5,1 a 15 Kg/día/Km	De 10,1 a 100 Kg/día
De 15,1 a 40 Kg/día/Km	De 100,1 a 500 Kg/día
Mayor a 40 Kg/día/Km	Mayor a 500 Kg/día
Localidades Bogotá D.C.	

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Datum: MAGNA
 EPSG: 9377
 Proyección: Transversa de Mercator
 Elipsoide: GRS80
 Falso Este: 5000000
 Falso Norte: 2000000

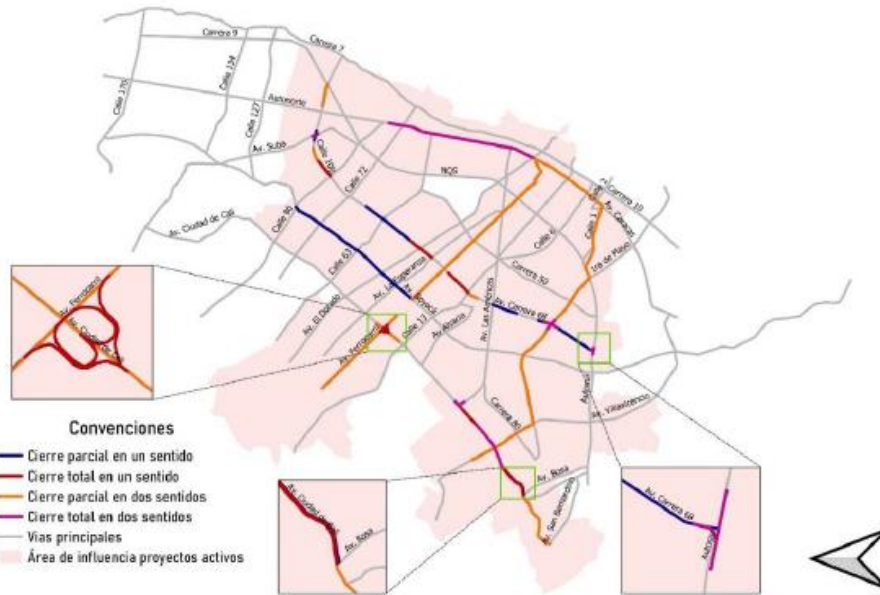
D. Anexo: Resultados modelación de escenarios.

Corredores intervenidos escenario 2021



Fuente: Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

Corredores intervenidos escenario 2023



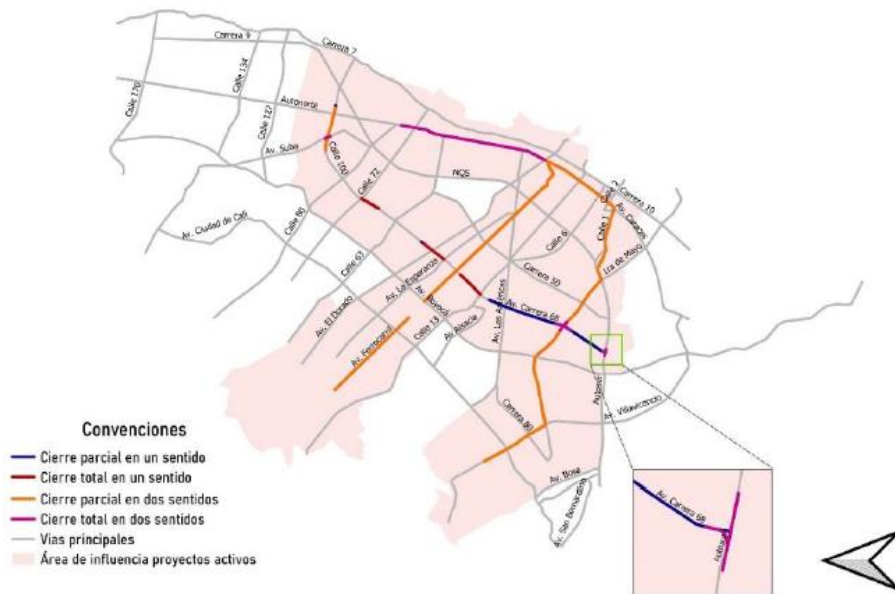
Fuente: Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

Corredores intervenidos escenario 2024



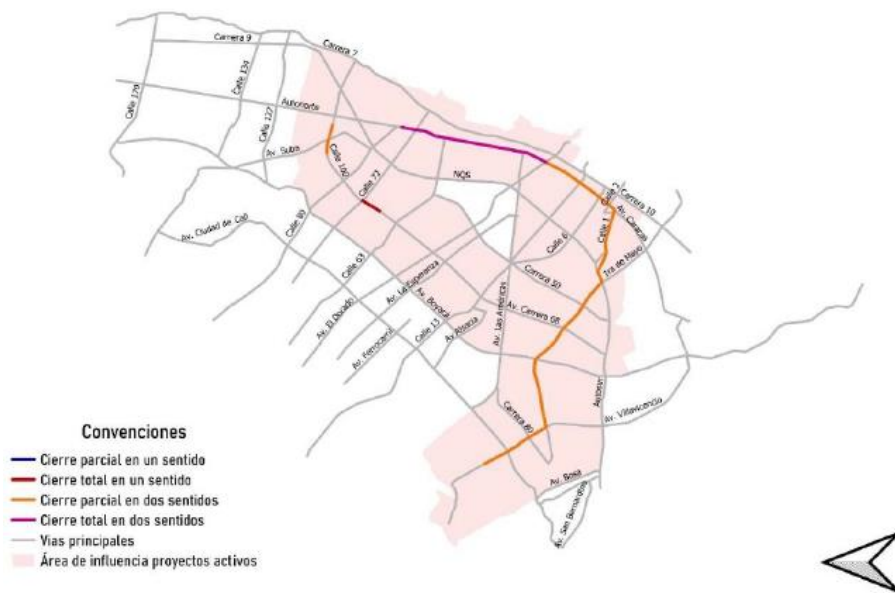
Fuente: Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

Corredores intervenidos escenario 2025



Fuente: Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

Corredores intervenidos escenario 2026



Fuente: Entregable 6 - Contrato Interadministrativo SDM-2020-1903 (Secretaría Distrital de Movilidad & Universidad Nacional de Colombia, 2021)

